



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PERANCANGAN KONTROLER *FUZZY* PD+I UNTUK  
*ELECTROMAGNETIC ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*  
(ABS) PADA KENDARAAN LISTRIK**

Muhammad Fasih Mubarrok  
NRP 2211 100 120

Dosen Pembimbing  
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.  
Andri Ashfahani, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

***DESIGN FUZZY PD+I CONTROLLER  
FOR ELECTROMAGNETIC ANTI-LOCK BRAKING  
SYSTEM (ABS) ON ELECTRIC VEHICLE***

Muhammad Fasih Mubarrok  
NRP 2211 100 120

Supervisor  
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.  
Andri Ashfahani, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015



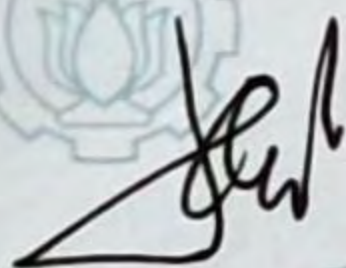
**PERANCANGAN KONTROLER FUZZY PD+I UNTUK  
ELECTROMAGNETIC ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM  
(ABS) PADA KENDARAAN LISTRIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

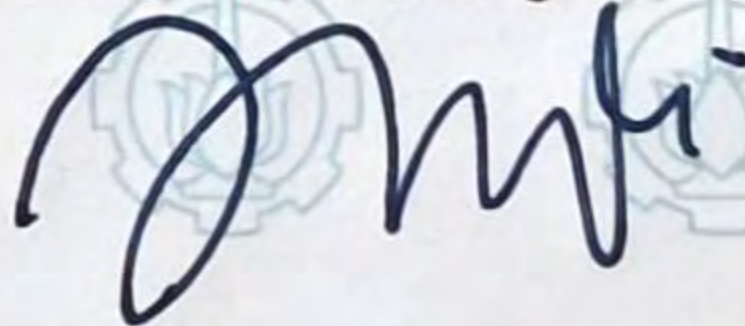
**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.**  
**NIP: 196210051990031003**

**Dosen Pembimbing II**



**Andri Ashfahani, ST., MT.**  
**NIP: 2200201405003**





# **PERANCANGAN KONTROLER FUZZY PD+I UNTUK ELECTROMAGNETIC ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM (ABS) PADA KENDARAAN LISTRIK**

**Nama** : Muhammad Fasih Mubarrok  
**Pembimbing I** : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.  
**Pembimbing II** : Andri Ashfahani, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

*Anti-lock braking system* (ABS) digunakan pada kendaraan roda empat untuk menjaga kontrol kendaraan dan mencegah roda terkunci pada saat pengereman mendadak. Roda sering terkunci saat pengereman mendadak pada jalan yang koefisien gesekannya kecil. Selama roda terkunci, kendaraan akan tergelincir, kehilangan kontrol kemudi (*understeering*), dan kendaraan sulit untuk berhenti akibat gaya geseknya berkurang secara cepat. Ketika kondisi ideal, penurunan kecepatan kendaraan harus sama dengan penurunan kecepatan putar roda, namun pada keadaan roda terkunci dan mengalami slip yang besar, perbedaan kecepatan kendaraan dan kecepatan roda sangat jauh sehingga dibutuhkan kontroler agar mengatur besar slip yang aman bagi mobil. Kondisi jalan yang tidak tetap serta perubahan nilai slip pada saat penurunan kecepatan kendaraan membuat parameter *plant* menjadi tidak linier sehingga kontroler konvensional PID kurang dapat mengatasi permasalahan tersebut. Pada Tugas Akhir ini digunakan metode *fuzzy* PD+I untuk mengontrol nilai slip pada *plant* simulator ABS agar tetap pada nilai 0,2 atau 20% dari slip maksimum yang bernilai 1. Proses pengereman pada simulator ABS menggunakan rem elektromagnetik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler *fuzzy* PD+I mampu mempertahankan nilai slip pada titik 0,2 tanpa adanya *overshoot* dan *error steady state* serta mempercepat *rise time* dan *settling time* sistem.

**Kata kunci:** *Anti-lock Braking System* (ABS), Kontroler *Fuzzy* PD+I, Rem Elektromagnetik, Simulator ABS.



**DESIGN FUZZY PD+I CONTROLLER  
FOR ELECTROMAGNETIC ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM  
(ABS) ON ELECTRIC VEHICLE**

**Name** : Muhammad Fasih Mubarrok  
**Advisor I** : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.  
**Advisor II** : Andri Ashfahani, S.T., M.T.

**ABSTRACT**

*Anti-lock braking system (ABS) is used to maintain steering control and to avoid wheels locking when the vehicle in braking state. Vehicle's wheels are locked in braking state when coefficient of the road is small. When vehicle's wheels in locked condition, the vehicle will skid and lose control of the wheels (understeering), and friction force on the wheels will decrease rapidly so that vehicle's speed is difficult to stop. Under ideal conditions, longitudinal speed of vehicle must be equal with rotary speed of wheels, but when the wheels are locked and slip, the differences in vehicle's speed and wheel's speed is big, so the vehicle needs a controller in order to adjust the slip value between vehicle's speed and wheel's speed in safe point for the driver. The variety conditions of road and variation of slip value when wheels decelerated make the plant model became non-linear, so the conventional PID controller cannot resolve this problem. In this book, I use the fuzzy PD+I method to control slip value of ABS simulator plant in 0.2 or 20% of maximum slip value. Braking proses in simulator ABS using electromagnetic brake. Result of the plant simulation indicate that fuzzy PD+I controller can regulates slip value of system in 0.2 of maximum slip value without overshoot and steady state error in small rise time and settling time.*

**Key words:** *Anti-lock Braking System (ABS), ABS Simulator, Electromagnetic Brake, Fuzzy PD+I Controller.*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan YME, yang telah memberikan nikmat dan hidayah-Nya, sehingga laporan Tugas Akhir yang berjudul:

**“Perancangan Kontroler *Fuzzy PD+I* untuk *Electromagnetic Anti-lock Braking System (ABS)* pada Kendaraan Listrik”**

dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam tetap penulis haturkan kepada Rasulullah SAW yang telah memberikan suri tauladan kepada kita semua.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, baik bantuan berupa tenaga, pikiran, maupun moril untuk penulis. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah turut serta berperan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, khususnya kepada dosen pembimbing, yakni Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng., dan Andri Ashfahani, S.T., M.T. yang selalu membimbing dan memberikan motivasi kepada penulis, kedua orang tua yang selalu mendoakan kesuksesan penulis, Saudara Rian Lukito, Benny Adijaya J, dan M. Fadli Ilmi, yang ketiganya tergabung dalam Tim ABS bersama penulis, Saudara Tito Luthfan R., Saudara Sondang Sentosa O, Saudara Hendra Antomy, Grup Bangku Depan, dan seluruh teman-teman yang memberikan dukungan penuh kepada penulis serta kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis akan menerima kritik dan saran dari para pembaca. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat khususnya untuk penulis, dan umumnya untuk semua pembaca laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
1.6 Relevansi.....	3
BAB 2 TEORI PENUNJANG.....	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System</i> .....	5
2.2 Simulator ABS.....	6
2.3 Identifikasi Sistem.....	8
2.3.1 Metode <i>Least Square</i> .....	9
2.3.2 Validasi Sistem.....	10
2.4 Arduino UNO.....	11
2.5 Rem Elektromagnetik.....	12
2.6 Sensor Kecepatan dan Piringan <i>Encoder</i> .....	13
2.7 Kontroler PID.....	14
2.7.1 Kontroler Tipe-P.....	15
2.7.2 Kontroler Tipe-PI.....	15
2.7.3 Kontroler Tipe-PD.....	15
2.7.4 Kontroler Tipe-PID.....	16
2.8 Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	16
2.8.1 Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	17
2.8.2 Fungsi Keanggotaan.....	18
2.8.3 Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	21
2.8.4 Fuzzifikasi.....	22
2.8.5 Inferensi <i>Fuzzy</i> .....	22

2.8.6 Defuzzifikasi .....	23
2.9 Metode Kontrol <i>Fuzzy</i> PD+I .....	24
<b>BAB 3 PERANCANGAN SISTEM</b> .....	27
3.1 Gambaran Umum Sistem .....	27
3.2 Perancangan Perangkat Keras .....	28
3.2.1 Perancangan Mekanik .....	28
3.2.2 Perancangan Elektronik .....	31
3.3 Perancangan Perangkat Lunak .....	35
3.3.1 <i>Software</i> Arduino UNO 1.6.3 .....	35
3.3.2 <i>Software</i> MATLAB R2103a.....	36
3.4 Proses Identifikasi dan Pemodelan <i>Plant</i> .....	36
3.4.1 Pengujian Kecepatan Motor DC.....	37
3.4.2 Pengujian <i>Open Loop</i> Simulator ABS.....	37
3.4.3 Metode Pemodelan <i>Plant</i> .....	39
3.5 Perancangan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I.....	41
3.5.1 Perancangan Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	41
3.5.2 Perancangan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I .....	45
<b>BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS</b> .....	47
4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem .....	47
4.2 Simulasi Sistem.....	47
4.2.1 Simulasi Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I.....	48
4.2.2 Perbandingan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I dengan <i>Fuzzy</i> .....	50
4.2.3 Perbandingan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I dengan PID.....	51
4.3 Implementasi Sistem .....	54
<b>BAB 5 PENUTUP</b> .....	57
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran .....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	59
<b>LAMPIRAN A</b> .....	61
A.1 Realisasi <i>Plant</i> Simulator ABS Tampak Atas.....	61
A.2 Realisasi <i>Plant</i> Simulator ABS Tampak Depan.....	62
<b>LAMPIRAN B</b> .....	63
B.1 Diagram Blok MATLAB untuk Implementasi .....	63
B.2 Diagram Blok Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I pada Implementasi .....	64
B.3 Diagram Blok Perhitungan Slip pada Implementasi .....	64
B.4 Program Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	65
B.5 Program Arduino .....	67
<b>RIWAYAT PENULIS</b> .....	69



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Spesifikasi Arduino UNO.....	12
<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi Motor DC .....	30
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi Rem Elektromagnetik .....	30
<b>Tabel 3.3</b>	Komponen <i>Driver</i> Motor DC .....	31
<b>Tabel 3.4</b>	Komponen <i>Driver</i> Rem Elektromagnetik .....	33
<b>Tabel 3.5</b>	Spesifikasi Sensor Kecepatan .....	34
<b>Tabel 3.6</b>	Hubungan Kecepatan Motor DC dengan <i>Duty Cyle</i> PWM.....	37
<b>Tabel 3.7</b>	Data Pengujian Tegangan Rem dan Rata-Rata Slip.....	38
<b>Tabel 3.8</b>	Hasil Pemodelan AR <i>Plant</i> Simulator ABS .....	39
<b>Tabel 3.9</b>	Hasil Pemodelan ARMA <i>Plant</i> Simulator ABS .....	39
<b>Tabel 3.10</b>	Rentang Daerah Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	42
<b>Tabel 3.11</b>	Basis Aturan Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	45
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil Perbandingan Kontroler PID, <i>Fuzzy</i> , <i>Fuzzy</i> PD+I .....	53

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Pengaruh Koefisien Gesek pada Slip .....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Simulator ABS .....	6
<b>Gambar 2.3</b>	Momen Gaya yang Bekerja pada Simulator ABS .....	7
<b>Gambar 2.4</b>	Arduino UNO .....	11
<b>Gambar 2.5</b>	Skema Rem Mikro Elektromagnetik .....	12
<b>Gambar 2.6</b>	Prinsip Kerja Rem Elektromagnetik .....	13
<b>Gambar 2.7</b>	Modul Sensor Kecepatan .....	14
<b>Gambar 2.8</b>	Cara Kerja Sensor Kecepatan dan Piringan <i>Encoder</i> ....	14
<b>Gambar 2.9</b>	Skema Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	17
<b>Gambar 2.10</b>	Himpunan Tegas (Merah) dan Himpunan <i>Fuzzy</i> (Biru) ..	18
<b>Gambar 2.11</b>	Fungsi Keanggotaan Segitiga .....	18
<b>Gambar 2.12</b>	Fungsi Keanggotaan Trapesium .....	19
<b>Gambar 2.13</b>	Fungsi Keanggotaan Gaussian .....	20
<b>Gambar 2.14</b>	Fungsi Keanggotaan Bel Umum .....	20
<b>Gambar 2.17</b>	Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	22
<b>Gambar 2.18</b>	Mekanisme Inferensi <i>Fuzzy</i> .....	23
<b>Gambar 2.19</b>	Diagram Blok Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I .....	24
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Blok Sistem Simulator ABS .....	27
<b>Gambar 3.2</b>	Konstruksi Mekanik Roda Bebas Atas .....	28
<b>Gambar 3.3</b>	Konstruksi Mekanik Roda Bawah dan Motor DC .....	29
<b>Gambar 3.4</b>	Prinsip Kerja Rem Elektromagnetik .....	31
<b>Gambar 3.5</b>	Rangkaian <i>Driver</i> Motor DC.....	32
<b>Gambar 3.6</b>	Rangkaian <i>Driver</i> Rem Elektromagnetik.....	33
<b>Gambar 3.7</b>	Rangkaian Sensor Kecepatan .....	35
<b>Gambar 3.8</b>	Perbandingan Slip dengan <i>Duty Cycle</i> Tegangan Rem ..	38
<b>Gambar 3.9</b>	Hasil Pemodelan AR Orde 4 dan Error Simulasi .....	40
<b>Gambar 3.10</b>	Respon Step Model Plant .....	41
<b>Gambar 3.11</b>	Himpunan Keanggotaan Masukan Error Slip.....	43
<b>Gambar 3.12</b>	Himpunan Keanggotaan Masukan Delta Error Slip .....	43
<b>Gambar 3.13</b>	Himpunan Keanggotaan Keluaran <i>Fuzzy</i> .....	43
<b>Gambar 3.14</b>	Blok Simulink Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I .....	45
<b>Gambar 4.1</b>	Respon Sistem dengan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I .....	48
<b>Gambar 4.2</b>	Sinyal kontrol Kontroler <i>Fuzzy</i> P, PD, PD+I .....	49
<b>Gambar 4.3</b>	Perbandingan Kontroler <i>Fuzzy</i> Dengan <i>Fuzzy</i> PD+I.....	50
<b>Gambar 4.4</b>	Perbandingan Sinyal Kontrol <i>Fuzzy</i> PD+I dan <i>Fuzzy</i> .....	51
<b>Gambar 4.5</b>	Perbandingan Kontroler <i>Fuzzy</i> PD+I dengan PID.....	52
<b>Gambar 4.6</b>	Perbandingan Sinyal Kontrol <i>Fuzzy</i> PD+I dengan PID..	53



# BAB 1

## PENDAHULUAN

Bab Pendahuluan membahas tentang latar belakang pelaksanaan topik Tugas Akhir ini, beserta tujuan dan permasalahan yang dihadapi. Pada bab ini terdapat enam bahasan pokok, yakni latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, sistematika penulisan, dan relevansi.

### 1.1 Latar Belakang

Pengereman laju kendaraan merupakan salah satu bagian penting dari sistem keamanan dan keselamatan bagi pengemudi kendaraan. Sistem pengereman yang baik akan memberikan rasa aman bagi pengendara, terutama saat kondisi koefisien gesekan jalan berbeda-beda. Salah satu sistem yang dapat mengatasi masalah pengereman pada kondisi jalan yang berbeda-beda tersebut adalah *anti-lock braking system* (ABS). *Anti-lock braking system* (ABS) adalah sistem yang terkontrol secara otomatis untuk mencegah roda kendaraan terkunci saat pengereman berlangsung, sehingga roda kendaraan tidak tergelincir dan laju mobil menurun secara linier dan laju mobil terkendali. Beberapa keuntungan dari penggunaan ABS adalah dapat menjamin kenyamanan dan kestabilan pengereman kendaraan pada kondisi jalan yang berbeda-beda, meningkatkan pengendalian kemudi kendaraan (*steering ability*), mengurangi jarak pengereman, mengurangi gaya sentrifugal saat melakukan pengereman mendadak yang dapat membuat mobil sulit dikendalikan. [1]

Salah satu jenis rem yang dapat digunakan pada ABS adalah rem elektromagnetik. Rem elektromagnetik adalah rem yang menggunakan gaya elektromagnetik untuk memperlambat gerakan poros roda kendaraan. Rem elektromagnetik terbuat dari sebuah piringan logam yang terpasang pada poros yang sama dengan roda kendaraan yang berputar. Piringan tersebut bersinggungan dengan lilitan atau kumparan konduktor yang dapat membangkitkan medan magnet ketika dialiri arus listrik. Ketika arus listrik melewati kumparan tersebut, timbul medan magnet pada rem elektromagnetik dan piringan yang bersinggungan akan tertarik dengan kuat ke rem, sehingga laju roda kendaraan yang berputar lama-kelamaan akan terhenti. [2]

Kontroler tradisional seperti PID (*proportional- integral-derivative*) tidak dapat berfungsi secara optimal pada sistem yang tidak linier dan tidak dapat mengurangi efek gangguan yang terjadi pada sistem. Kontrol

*fuzzy* merupakan metode kontrol cerdas yang meniru cara berpikir atau logika manusia. Kontrol *fuzzy* juga tidak membutuhkan model matematika *plant* yang sering kali sulit untuk didapatkan. Terlebih lagi, kontrol *fuzzy* tidak terpengaruh dengan variasi-variasi parameter *plant*, dan memiliki ketahanan (*robustness*) yang kuat. Kontrol *fuzzy* dapat mengatasi *plant* yang tidak linier seperti pada ABS. Namun kontrol *fuzzy* sulit mengatasi *error steady state*, sehingga dibutuhkan kolaborasi dua metode kontrol tersebut. untuk mengatasi permasalahan pada *plant* seperti sistem yang tidak linier, gangguan pada sistem, dan *error steady state* pada sistem.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Perumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah bagaimana cara mencegah roda terkunci selama proses pengereman, serta agar penurunan kecepatan longitudinal kendaraan dan kecepatan putar roda kendaraan mengalami penurunan yang sama. Cara untuk mencegah roda terkunci adalah dengan mengatur agar rasio slip antara roda dengan permukaan jalan bernilai 0,2 atau 20%.

## **1.3 Batasan Masalah**

Terdapat beberapa batasan masalah dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, yakni:

1. Objektif kontrol pada Tugas Akhir ini adalah mengatur agar slip antara roda kendaraan dan jalan berada pada nilai 20% atau 0,2 dari nilai maksimum 1.
2. Pengujian slip dilakukan menggunakan *plant* simulator ABS yang memiliki dua komponen utama, yakni roda atas yang mewakili kecepatan putar roda kendaraan dan roda bawah yang mewakili kecepatan longitudinal kendaraan.
3. Roda bawah simulator ABS mempresentasikan satu kondisi jalan, yakni lurus, kering, dan rata.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah untuk merancang kontroler *fuzzy* PD+I yang dapat mempertahankan slip antara roda kendaraan dan jalan agar selalu pada nilai slip yang ditentukan yakni 20% dengan beberapa kriteria jalan yang telah ditentukan, yakni kondisi kering, lurus, dan rata. Pengaturan nilai slip pada saat pengereman laju roda kendaraan yang tepat dapat membuat penurunan kecepatan



longitudinal kendaraan dan kecepatan putar roda kendaraan liner dan bersamaan, serta mencegah roda kendaraan dalam keadaan terkunci.

## **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan buku laporan Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima bab, yakni :

### **Bab 1: Pendahuluan**

Bab pendahuluan meliputi latar belakang pelaksanaan topik Tugas Akhir, permasalahan topik Tugas Akhir, tujuan penelitian, sistematika penulisan laporan, dan relevansi topik yang dikerjakan.

### **Bab 2: Teori Penunjang**

Bab teori penunjang membahas tinjauan pustaka yang membantu pengerjaan Tugas Akhir, diantaranya adalah konsep sistem ABS, teori pengereman mobil, teori rem elektromagnetik, dan teori kontroler *fuzzy*-PID.

### **Bab 3: Perancangan Sistem**

Bab perancangan sistem membahas tentang perancangan sistem ABS dengan menggunakan rem elektromagnetik serta perancangan algoritma kontroler *fuzzy*-PID berdasarkan teori pada Bab 2.

### **Bab 4: Pengujian dan Analisis**

Bab pengujian dan analisis memuat hasil simulasi dan analisa kontroler pada sistem dan implementasinya pada real *plant* yang digunakan, yakni simulator ABS

### **Bab 5: Penutup**

Bab penutup berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan Tugas Akhir yang telah diperoleh.

## **1.6 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah mampu menjadi bahan referensi dalam perancangan kontroler *fuzzy* PD+I untuk sistem *Anti-lock Braking System* (ABS) khususnya, maupun untuk *plant* tidak linier lainnya pada umumnya.

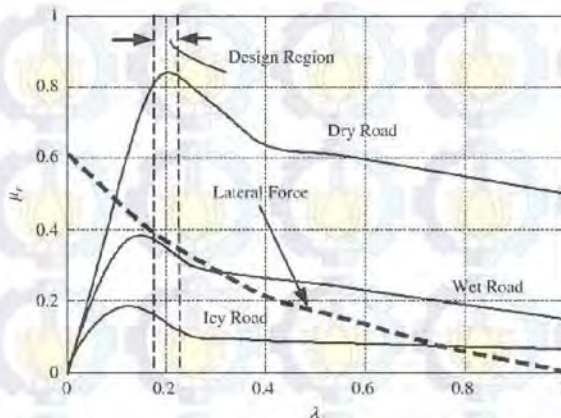
## BAB 2

### TEORI PENUNJANG

Bab Teori Penunjang akan memaparkan mengenai teori-teori dasar yang menunjang pengerjaan Tugas Akhir ini. Konsep ABS, identifikasi sistem, rem elektromagnetik, sensor kecepatan, logika *fuzzy*, dan kontroler *fuzzy* PD+I dibahas pada bab ini.

#### 1.1 Anti-Lock Braking System [1] [2]

*Anti-lock Braking System* (ABS), atau yang biasa disebut dengan *anti-lock system* (ALS), merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mencegah roda kendaraan terkunci akibat terjadi pengereman laju roda pada kecepatan tertentu. Kemampuan ABS untuk mencegah roda dalam keadaan terkunci pada kecepatan tertentu tersebut berasal dari hubungan antara koefisien gesek jalan ( $\mu_r$ ) dengan slip rasio roda ( $\lambda$ ). Koefisien gesek jalan tergantung dari beberapa faktor, yakni kondisi permukaan jalan (kering atau basah), sudut ban yang menempel dipermukaan, jenis ban, kecepatan kendaraan, dan rasio slip antara roda dengan permukaan jalan.



**Gambar 2.1** Pengaruh Koefisien Gesek pada Slip [1]

Gambar 2.1 diatas memperlihatkan hubungan antara koefisien gesekan ( $\mu_r$ ) beberapa kondisi jalan dengan besar nilai slip ( $\lambda$ ) pada kendaraan. Nilai slip ( $\lambda$ ) yang ingin dipertahankan adalah didaerah

dengan nilai koefisien gesekan terbesar ( $\mu_r$ ), yakni disekitar 0.2. Berikut merupakan persamaan matematika slip ( $\lambda$ ) pada roda kendaraan:

$$\lambda = \frac{v_l - \omega R}{v_l} \quad (2.1)$$

dengan:

$v_l$  = kecepatan longitudinal kendaraan (m/s),

$\omega$  = kecepatan sudut roda (rad/s),

$R$  = jari-jari roda kendaraan (m).

## 1.2 Simulator ABS [3] [4] [5]

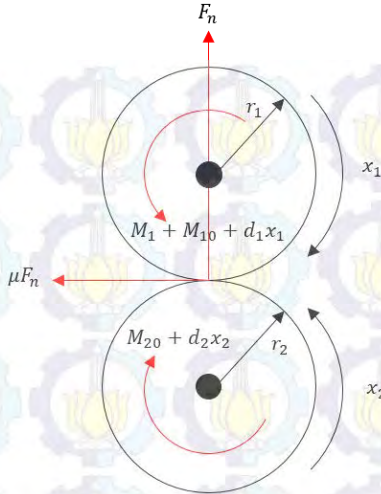
Salah satu cara untuk menguji performa ABS ialah dengan menggunakan simulator ABS. Simulator ABS merupakan suatu alat yang meniru cara kerja serta dinamika kendaraan saat mengalami proses pengereman. Komponen utama dari simulator ABS adalah dua buah roda yang permukaannya saling bersinggungan, dengan roda sebelah atas merupakan roda bebas dan roda bawah diputar dengan motor. Gambar 2.2 dibawah merupakan contoh simulator ABS produksi INTECO:



**Gambar 2.2** Simulator ABS [3]

Simulator ABS hanya memperhitungkan dinamika longitudinal kendaraan dan tidak mempertimbangkan dinamika vertikal dan lateral (samping) kendaraan. Kecepatan putar roda bebas mewakili kecepatan putar roda mobil ( $\omega$ ) dan kecepatan putar roda bawah yang diputar dengan motor mewakili kecepatan longitudinal mobil ( $v$ ).





**Gambar 2.3** Momen Gaya yang Bekerja pada Simulator ABS

Torsi rem ditambahkan pada roda bagian atas yang mewakili roda kendaraan dan menyebabkan perlambatan pada roda atas. Persamaan matematika momen gaya yang bekerja pada roda bagian atas simulator ABS sesuai dengan Gambar 2.3 adalah sebagai berikut:

$$J_1 \dot{x}_1 = -F_n r_1 s \mu(\lambda) - d_1 x_1 - M_1 - s_1 M_{10} \quad (2.2)$$

dengan:

- $J_1$  = momen inersia pada roda atas,
- $\dot{x}_1$  = kecepatan angular roda atas,
- $r_1$  = jari-jari roda atas,
- $d_1$  = koefisien gaya gesek dinamis permukaan roda atas,
- $M_{10}$  = gaya gesek statis permukaan roda atas,
- $M_1$  = torsi rem pada roda atas,
- $F_n$  = gaya normal,
- $\mu(\lambda)$  = koefisien gesek permukaan jalan.

Sedangkan persamaan matematika untuk roda bawah simulator ABS adalah sebagai berikut:

$$J_2 \dot{x}_2 = -F_n r_2 s \mu(\lambda) - d_2 x_2 - s_2 M_{20} \quad (2.3)$$

dengan,

$J_2$  = momen inersia pada roda bawah,

$\dot{x}_2$  = kecepatan angular roda bawah,

$r_2$  = jari-jari roda bawah,

$d_2$  = koefisien gaya gesek dinamis permukaan roda bawah,

$M_{20}$  = gaya gesek statis permukaan roda bawah.

Selain variabel diatas, terdapat pula variabel bantu  $s$  yang berguna untuk membedakan arah rotasi roda dan bernilai konstan, yakni  $s = \text{sgn}(r_2 x_2 - r_1 x_1)$ ,  $s_1 = \text{sgn}(x_1)$ , dan  $s_2 = \text{sgn}(x_2)$ .

### 1.3 Identifikasi Sistem [6]

Identifikasi sistem dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter model pendekatan dari sistem berdasarkan masukan dan keluaran sistem yang terukur. Model pendekatan sistem berdasarkan respon waktu dapat melalui dua respon waktu, yakni kontinyu maupun diskrit. Pada pendekatan respon waktu diskrit, sinyal uji yang digunakan pada sistem adalah sinyal random untuk identifikasi *offline*, sedangkan untuk identifikasi *online* menggunakan sinyal kontrol. Berikut merupakan bentuk umum pemodelan sistem *single input single output* (SISO) pendekatan waktu diskrit:

$$y(k) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} \eta(k) \quad (2.4)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

$$q^{-i} y(k) = y(k-i)$$

$$u^{-i} y(k) = u(k-i)$$

dengan:

$d$  = faktor *delay*,

$na$  = orde sistem,

$nb$  = orde masukan,

$nc$  = orde *noise*.

Terdapat dua bentuk struktur pendekatan pemodelan *plant* yang dapat digunakan dalam pemodelan sistem, yakni struktur deterministik dan struktur stokastik. Struktur deterministik merupakan struktur pemodelan tanpa mengikutsertakan *noise* sedangkan struktur stokastik

merupakan struktur pemodelan dengan mengikutsertakan *noise* pada pemodelan sistem. Struktur deterministik pada respon waktu diskrit memiliki tiga buah bentuk pemodelan, yakni *auto regressive moving average* (ARMA), *auto regressive* (AR), dan *moving average* (MA). Berikut merupakan bentuk persamaan dari ARMA, AR, dan MA:

- Bentuk pemodelan ARMA:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} (k-na) + b_0 x(k-d) + \dots + b_{nb} x(k-d-nb) \quad (2.5)$$

- Bentuk pemodelan AR:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} (k-na) + b_0 x(k-d) \quad (2.6)$$

- Bentuk pemodelan MA:

$$y(k) = b_0 x(k-d) + \dots + b_{nb} x(k-d-nb) \quad (2.7)$$

Beberapa metode identifikasi parameter yang sering digunakan adalah metode identifikasi parameter linier simultan, metode *gradient* dan metode *least square*. Pada Tugas Akhir ini digunakan metode *least square* dalam identifikasi parameter.

### 1.3.1 Metode *Least Square* [6] [7]

Suatu sistem dengan masukan  $u(t)$  dan keluaran  $y(t)$ , dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} (k-na) + b_1 x(k-1) + b_m u(k-m) \quad (2.8)$$

untuk menyederhanakan notasi, maka:

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_{na} \quad b_1 \quad \dots \quad b_m]^T \quad (2.9)$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-n) \quad u(t-1) \quad \dots \quad u(t-m)]^T \quad (2.10)$$

sehingga, Persamaan (2.8) dapat ditulis:

$$y(t) = \hat{y}(t | \theta) = \varphi^T(t) \theta \quad (2.11)$$

dengan  $\hat{y}(t | \theta)$  merupakan estimasi keluaran  $y(t)$ .

Ketika parameter  $\theta$  tidak diketahui, kita dapat mengestimasi parameter  $\theta$  dengan mengukur masukan dan keluaran sistem pada selang waktu  $1 \leq t \leq N$ , dengan Persamaan (2.12):

$$\hat{\theta}_N = \min V_N(\theta, Z^N) \quad (2.12)$$

dengan,



$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \varphi^T(t)\theta)^2$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t | \theta))^2 \quad (2.12)$$

$$Z^N = \{u(1), y(1) \dots u(N), y(N)\} \quad (2.13)$$

Nilai minimum  $\hat{\theta}_N$  dapat dicari dengan menurunkan fungsi  $V_N(\theta, Z^N)$  sampai nol:

$$0 = dV^N(\theta, Z^N) = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)(y(t) - \varphi^T(t)\theta) \quad (2.14)$$

sehingga didapatkan,

$$\sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) = \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t)\theta \quad (2.15)$$

atau,

$$\hat{\theta}_N = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad (2.16)$$

### 1.3.2 Validasi Sistem [8]

Model matematika yang telah dibuat, harus dilakukan validasi dengan data aktual sistem. Hal tersebut dilakukan untuk menentukan tingkat keakuratan model yang telah dibuat. Proses penghitungan eror dengan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Eror yang diperoleh merupakan selisih antara nilai keluaran pada model matematika dengan nilai keluraan aktual hasil identifikasi sistem. Penghitungan RMSE dapat dituliskan dengan Persamaan (2.17) berikut:

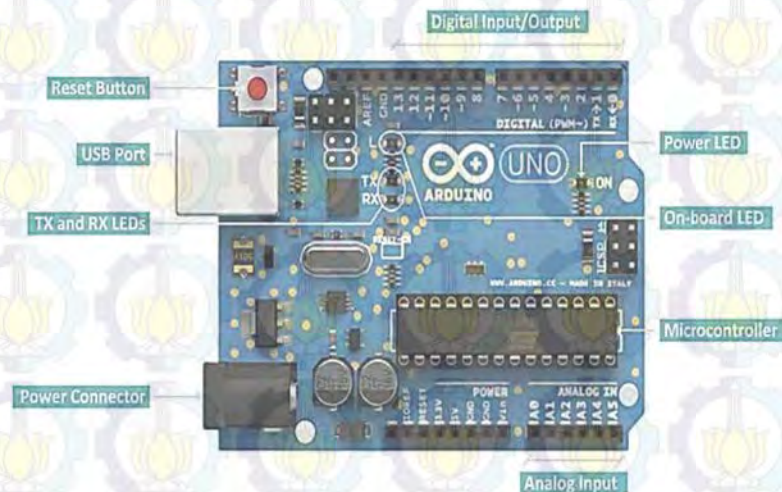
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_a - y_m)^2} \quad (2.17)$$

dengan  $y_a$  adalah nilai keluaran aktual,  $y_m$  adalah nilai keluaran hasil pemodelan, dan N adalah jumlah data.

## 1.4 Arduino UNO [9]

Arduino adalah pengendali mikro *single-board* yang bersifat *open-source*, dan dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. Arduino memiliki prosesor Atmel AVR dan menggunakan bahasa pemrograman sendiri untuk *software* Arduino. Arduino UNO mempunyai 14 pin *digital input/output* (6 di antaranya dapat digunakan sebagai keluaran PWM), 6 masukan analog, sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah konektor USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol *reset*.

ATMega328 pada Arduino UNO menyediakan *port* komunikasi serial *universal asynchronous receiver-transmitter* (UART TTL) 5 Volt, pada pin digital 0 sebagai penerima (RX) dan pin digital 1 sebagai pengirim (TX). Komunikasi serial mikrokontroler dengan komputer melalui USB akan tampil pada *virtual com port software* Arduino di komputer. *Software* Arduino dilengkapi dengan jendela monitoring yang menampilkan data sederhana untuk dikirim maupun diterima oleh *board* Arduino. LED untuk indikator TX dan RX pada *board* akan menyala saat terjadi proses pengiriman data melalui chip *USB to Serial* dan koneksi USB pada komputer. Gambar 2.4 berikut merupakan bentuk fisik dari Arduino UNO:



**Gambar 2.4** Arduino UNO [10]

Spesifikasi yang dimiliki oleh Arduino UNO tertera pada Tabel 2.1 berikut:

**Tabel 2.1** Spesifikasi Arduino UNO

Mikrokontroler	ATmega328
Tegangan pengoprasian	5 V
Tegangan masukan yang disarankan	7.12 V
Batas tegangan masukan	6.20 V
Jumlah <i>pin</i> I/O <i>digital</i>	14 (6 di antaranya menyediakan keluaran PWM)
Jumlah <i>pin</i> masukan <i>analog</i>	6
Arus DC tiap <i>pin</i> I/O	40 mA
Arus DC untuk <i>pin</i> 3,3 V	50 mA
Memori <i>Flash</i>	32 kb (ATmega328), sekitar 0,5 kb digunakan oleh <i>boot loader</i>
SRAM	2 kb (ATmega328)
EEPROM	1 kb (ATmega328)
Kecepatan <i>Clock</i>	16 MHz

### 1.5 Rem Elektromagnetik

Rem elektromagnetik adalah komponen yang berfungsi untuk memperlambat laju kendaraan menggunakan gaya elektromagnetik. Rem elektromagnetik memanfaatkan medan listrik hasil dari aliran listrik pada kumparan, sehingga rem bergesekan dengan piringan besi pada poros kendaraan. Salah satu jenis rem elektromagnetik adalah mikro elektromagnetik, seperti pada Gambar 2.5 berikut:



**Gambar 2.5** Skema Rem Mikro Elektromagnetik [11]



Rem mikro elektromagnetik terdiri dari kumparan dan sebuah piringan besi didepan kumparan yang berputar sesuai putaran roda. Sesuai dengan Hukum Ampere, hubungan antara arus dan kuat medan magnet ( $B$ ) pada rem elektromagnetik dapat dirumuskan dalam Persamaan (2.18) berikut [12]:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{d} a_z \quad (2.18)$$

dengan:

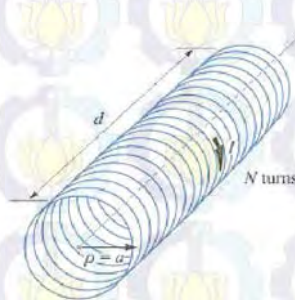
$\mu_0$  = konstanta permeabilitas ruang hampa,

$N$  = jumlah lilitan,

$d$  = panjang lilitan (m),

$a_z$  = arah vektor kuat medan magnet

$I$  = arus yang mengalir pada lilitan (A).



**Gambar 2.6** Prinsip Kerja Rem Elektromagnetik [12]

Kuat medan magnet yang dihasilkan oleh rem akan menarik piringan besi yang berputar seporos dengan roda kendaraan dan bergesekan. Semakin kuat medan magnet yang dihasilkan, semakin erat rem akan menarik piringan besi dan semakin besar pula gaya gesek yang timbul.

### 1.6 Sensor Kecepatan dan Piringan *Encoder*

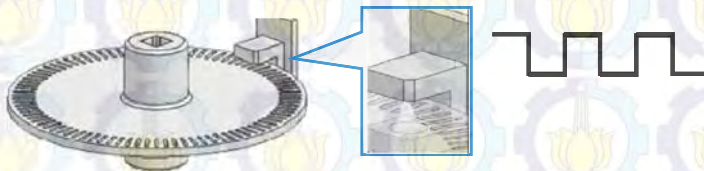
Sensor kecepatan digunakan untuk mengukur kecepatan putar roda atas dan roda bawah simulator ABS. Sensor akan mendeteksi tiap lubang pada piringan *encoder* dan mengubahnya dalam bentuk pulsa listrik. Pulsa

listrik yang dikeluarkan oleh sensor kecepatan hasil pembacaan piringan encoder berupa sinyal *pulse width modulator* (PWM).



**Gambar 2.7** Modul Sensor Kecepatan [13]

Piringan *encoder* memiliki sejumlah lubang yang mengitari sisinya dengan jarak tertentu. Sensor mendeteksi lubang pada encoder dengan menggunakan *optocoupler*. *Optocoupler* terdiri dari dua bagian utama, yakni *transmitter* berupa *light emitting diode* (LED) dan *receiver* berupa fototransistor yang dapat mendeteksi cahaya. Apabila cahaya dari *transmitter* melewati lubang piringan *encoder* dan diterima oleh *receiver*, maka sensor akan mengeluarkan pulsa listrik 5 Volt, sedangkan saat cahaya tidak melewati lubang piringan *encoder* dan *receiver* tidak menerima cahaya, maka sensor akan mengeluarkan pulsa listrik 0,5 Volt.



**Gambar 2.8** Cara Kerja Sensor Kecepatan dan Piringan *Encoder* [14]

### 1.7 Kontroler PID [15]

Kontroler PID adalah kontroler yang memanfaatkan sinyal eror sistem yang akan olah tiga elemen kontroler, yakni proporsional, integral, dan derivatif. Tiga elemen dalam kontroler PID tersebut dapat

dikombinasikan menjadi beberapa tipe kontroler sesuai dengan kebutuhan plant. Berikut merupakan beberapa tipe dari kontroler PID:

### 1.7.1 Kontroler Tipe-P

Kontroler tipe-P merupakan kontroler yang hanya terdiri dari elemen proporsional saja. Hubungan antara masukan sinyal error  $e(t)$  dengan sinyal kontrol  $u(t)$  pada kontroler proporsional adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.19)$$

atau dalam bentuk *transfer function* dapat dituliskan,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.20)$$

dengan  $K_p$  adalah penguatan proporsional.

$K_p$  berfungsi untuk mempercepat kecepatan respon sistem. Semakin besar nilai  $K_p$ , maka semakin cepat respon sistem. Namun penggunaan nilai  $K_p$  yang terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* pada sistem, dan jika nilai  $K_p$  terlalu kecil, maka *settling time* sistem akan lambat.

### 1.7.2 Kontroler Tipe-PI

Kontroler tipe-PI merupakan kontroler yang terdiri dari penguatan proporsional dan integral. Hubungan antara masukan sinyal error  $e(t)$  dengan sinyal kontrol  $u(t)$  pada kontroler tipe-PI adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.21)$$

atau dalam bentuk *transfer function* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right\} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.22)$$

dengan  $K_i$  adalah penguatan integral dan  $\tau_i$  adalah waktu integral

$K_i$  berfungsi untuk menghilangkan *error steady state*. Namun, apabila nilai  $K_i$  terlalu besar, maka dapat menimbulkan osilasi pada sinyal keluaran sistem sehingga sistem menjadi tidak stabil

### 1.7.3 Kontroler Tipe-PD

Kontroler tipe-PD merupakan kontroler yang hanya terdiri dari penguatan proporsional dan derivatif. Hubungan antara masukan sinyal



eror  $e(t)$  dengan sinyal kontrol  $u(t)$  pada kontroler tipe-PD adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.23)$$

atau dalam bentuk *transfer function*, Persamaan (2.13) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \{1 + \tau_d s\} = K_p + K_d s \quad (2.24)$$

dengan  $K_d$  adalah penguatan deferensial kontroler dan  $\tau_d$  adalah waktu derivatif kontroler.

$K_d$  berfungsi untuk mengurangi *overshoot* dan meningkatkan kestabilan sistem. Saat nilai  $K_d$  terlalu besar, maka *settling time* keluaran sistem akan sangat lama.

#### 1.7.4 Kontroler Tipe-PID

Kontroler tipe-PID merupakan kontroler yang memiliki penguatan proporsional, integral, dan derivatif. Hubungan antara masukan sinyal eror  $e(t)$  dengan sinyal kontrol  $u(t)$  pada kontroler proporsional integral dan derivatif adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_i \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.25)$$

atau dalam bentuk *transfer function*, Persamaan (2.8) diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.26)$$

### 1.8 Kontroler Fuzzy [16] [17] [18]

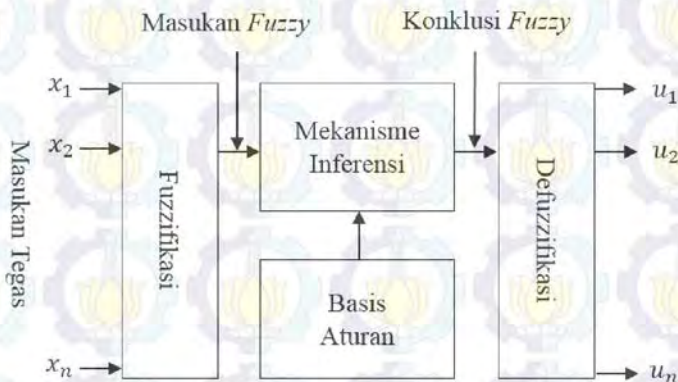
Kontroler *fuzzy* merupakan salah satu kontrol cerdas, yang memiliki algoritma seperti cara berfikir manusia. Logika *fuzzy* pertama kali dikembangkan oleh Lofti A. Zadeh dalam papernya yang berjudul “*Fuzzy Set*” pada tahun 1965.

Dalam algoritma kontrol *fuzzy*, dibuat aturan-aturan yang sesuai dengan kebiasaan atau pengalaman manusia saat mengatur proses suatu objek kontrol atau *plant* secara manual. Aturan-aturan dasar yang sesuai dengan kebiasaan manusia tersebut memiliki kualifikasi bahasa yang samar dan tidak kaku (*linguistic variable*) seperti yang digunakan oleh

manusia. Aturan dasar *fuzzy* dapat ditulis dengan menggunakan format sebagai berikut:

*If premis then konsekuen*

Premis merupakan variabel masukan *fuzzy* dan konsekuen merupakan variabel keluaran *fuzzy*. Variabel *fuzzy* memiliki derajat keanggotaan yang bernilai antara satu dan nol dan terhimpun dalam suatu himpunan *fuzzy*.



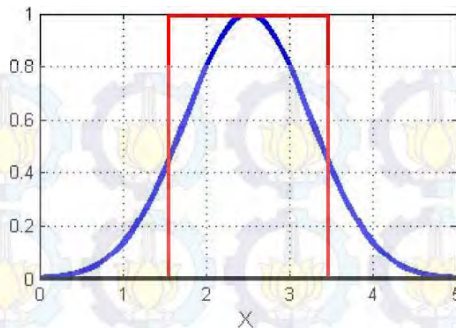
**Gambar 2.9** Skema Kontroler *Fuzzy*

Gambar 2.9 diatas merupakan skema kontroler *fuzzy* yang memiliki empat tahapan proses, yakni fuzzifikasi, basis aturan, mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi. Selain empat tahapan proses diatas, terdapat beberapa istilah penting yang perlu diketahui dalam logika *fuzzy*, antara lain himpunan *fuzzy* dan fungsi keanggotaan *fuzzy*.

### 1.8.1 Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *fuzzy* merupakan sebuah himpunan dengan elemen-elemen yang memiliki derajat parsial, tanpa batasan yang kaku. Pada himpunan *fuzzy*, elemen-elemen pada semesta pembicaraan dapat menjadi anggota himpunan sekaligus tidak menjadi anggota himpunan.

Keanggotaan elemen-elemen pada semesta pembicaraan dipengaruhi oleh derajat keanggotaannya. Hal ini berbeda dengan himpunan tegas (klasik) yang elemen-elemen pada semesta pembicaraan hanya dapat digolongkan termasuk atau tidak termasuk dalam suatu himpunan.



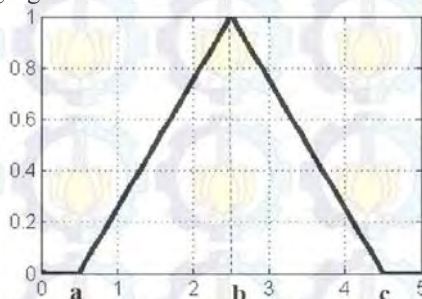
**Gambar 2.10** Himpunan Tegas (Merah) dan Himpunan *Fuzzy* (Biru)

Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan antara himpunan tegas dengan himpunan *fuzzy*. Pada himpunan tegas, (garis merah) tidak terdapat derajat keanggotaan dan elemen pada semesta pembicaraan hanya digolongkan dalam himpunan ataupun tidak. Sedangkan himpunan *fuzzy* (garis biru) memiliki derajat keanggotaan yang memungkinkan elemen untuk masuk diantara dua himpunan keanggotaan.

### 1.8.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan adalah suatu fungsi yang memetakan letak tiap masukan pada nilai keanggotaan atau derajat keanggotaan, yang bernilai antara satu dan nol. Berikut merupakan macam-macam fungsi keanggotaan pada logika *fuzzy*:

a) Fungsi segitiga



**Gambar 2.11** Fungsi Keanggotaan Segitiga

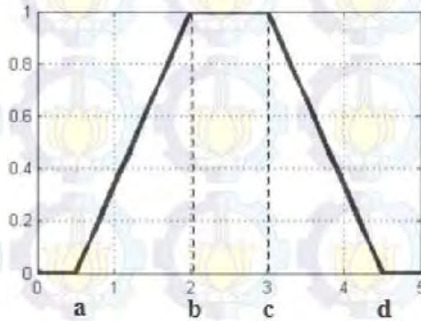
Fungsi keanggotaan segitiga memiliki bentuk persamaan matematika seperti berikut:



$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.27)$$

dengan  $a$  merupakan titik naik fungsi segitiga,  $b$  merupakan titik puncak fungsi segitiga, dan  $c$  merupakan titik turun fungsi segitiga.

b) Fungsi Trapesium



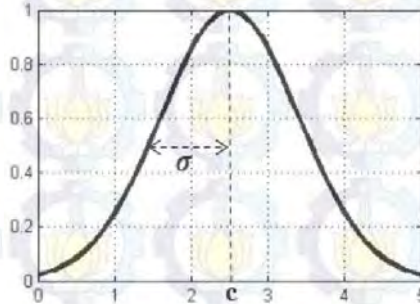
**Gambar 2.12** Fungsi Keanggotaan Trapesium

Fungsi keanggotaan trapesium memiliki bentuk persamaan matematika seperti berikut:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.28)$$

dengan  $a$  merupakan titik naik fungsi trapesium,  $b$  dan  $c$  merupakan titik puncak fungsi trapesium, dan  $d$  merupakan titik turun fungsi trapesium.

c) Fungsi *Gaussian*



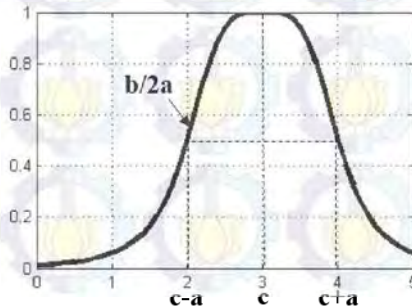
**Gambar 2.13** Fungsi Keanggotaan *Gaussian*

Fungsi keanggotaan *gaussian* memiliki bentuk persamaan matematika seperti berikut:

$$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.29)$$

dengan  $\sigma$  merupakan lebar fungsi *gaussian*, yang mempengaruhi lebar kelengkungan kurva dari titik pusat fungsi dan  $c$  merupakan titik puncak (*peak point*) fungsi.

d) Fungsi Bel umum



**Gambar 2.14** Fungsi Keanggotaan Bel Umum

Fungsi keanggotaan bel umum atau *generalized bell* memiliki persamaan matematika seperti berikut:

$$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.30)$$

dengan  $a$  merupakan lebar fungsi bel umum dari titik pusat dan  $b$  merupakan parameter yang mengubah kemiringan *slope* fungsi bel umum dan  $c$  adalah titik tengah fungsi bel umum.

### 1.8.3 Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan *fuzzy* merupakan operasi logika terhadap dua buah fungsi keanggotaan atau lebih yang saling bersinggungan satu sama lain. Ada beberapa operasi yang dapat digunakan pada himpunan *fuzzy*, yakni [18]:

a) Komplemen (*NOT*)

Operasi *NOT* pada himpunan *fuzzy*  $A$  dengan fungsi keanggotaan  $\mu_A$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.31)$$

b) Interseksi (*AND*)

Interseksi dari himpunan *fuzzy*  $A$  dan  $B$  dengan himpunan semesta  $X$  dinotasikan dengan  $A \cap B$  dapat dinyatakan dalam dua metode berikut:

1) Minimum

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.32)$$

2) *Algebraic product*

$$\mu_{A \cap B}(x) = \{ \mu_A(x) \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.33)$$

c) Union (*OR*)

Union dari himpunan *fuzzy*  $A$  dan  $B$  dengan himpunan semesta  $X$  dinotasikan dengan  $A \cup B$  dapat dinyatakan dalam dua metode berikut:

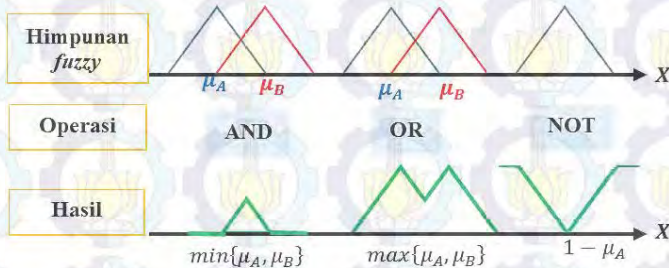
1) Maksimum

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.34)$$



## 2) Algebraic sum

$$\mu_{A \cup B}(x) = \{ \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.35)$$



**Gambar 2.15** Operasi Himpunan Fuzzy

### 1.8.4 Fuzzifikasi

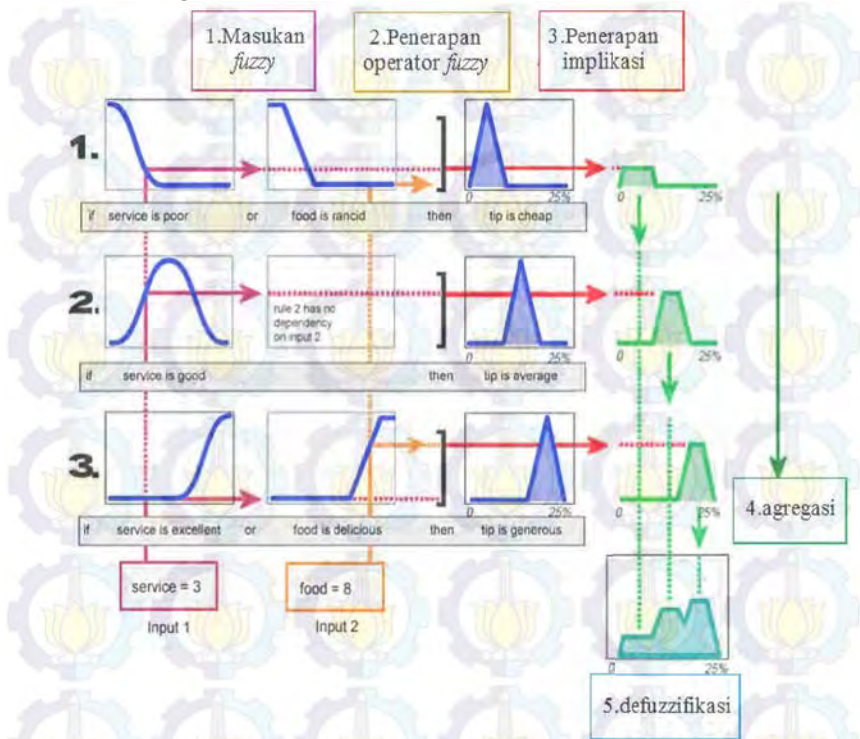
Fuzzifikasi berfungsi untuk mengubah masukan tegas dari suatu proses (tegangan, kecepatan, suhu, dll) menjadi masukan *fuzzy* dalam sebuah himpunan masukan *fuzzy*. Masukan tegas yang terfuzzifikasi tersebut akan dikelompokkan dalam fungsi keanggotaan dengan rentang tertentu. Metode fuzzifikasi yang umum digunakan adalah metode *singleton*. Metode *singleton* adalah metode fuzzifikasi dengan nilai masukan pada satu titik dan bernilai nol pada titik lainnya.

### 1.8.5 Inferensi Fuzzy

Inferensi *fuzzy* berfungsi untuk menentukan derajat keaktifan tiap aturan saat ada masukan *fuzzy* serta menentukan implikasi konsekuensi sesuai dengan tiap aturan yang aktif sebelumnya. Langkah-langkah atau mekanisme inferensi *fuzzy* dalam penentuan keputusan seperti yang tertera pada Gambar 2.16 dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Fuzzifikasi masukan, yakni pemetaan masukan tegas kedalam derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*.
- Penerapan operator *fuzzy*, yakni penggunaan operasi logika semisal AND atau OR untuk menentukan hasil perpotongan tiap fungsi keanggotaan.
- Penerapan metode implikasi, yakni pencarian konklusi atau hasil dari aturan *if-then* berdasarkan derajat fungsi keanggotaan premis masukan.
- Agregasi, yakni pengkombinasian semua hasil dari aturan *if-then* menjadi satu.

- e) Defuzzifikasi, yakni perubahan hasil agregasi menjadi keluaran tegas.



**Gambar 2.16** Mekanisme Inferensi Fuzzy [18]

### 1.8.6 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses perubahan keluaran fuzzy menjadi keluaran tegas (*crisp*). Terdapat dua macam metode defuzzifikasi yang umum digunakan, yakni:

- COG (*Center of Gravity*)

Metode COG menghitung keluaran fuzzy menggunakan titik tengah dari setiap hasil implikasi fuzzy. Metode COG dapat dituliskan dalam persamaan:

$$u^{tegas} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_i \int \mu_{(i)}} \quad (2.36)$$

dengan  $b_i$  metupakan titik tengah fungsi keanggotaan dan  $\int \mu_{(i)}$  adalah luas area dibawah fungsi keanggotaan  $\mu_{(i)}$ .

b. *Center Average*

Metode *center average* menghitung rata-rata dari nilai tengah fungsi keanggotaan keluaran implikasi operator *fuzzy*. Metode *center average* dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

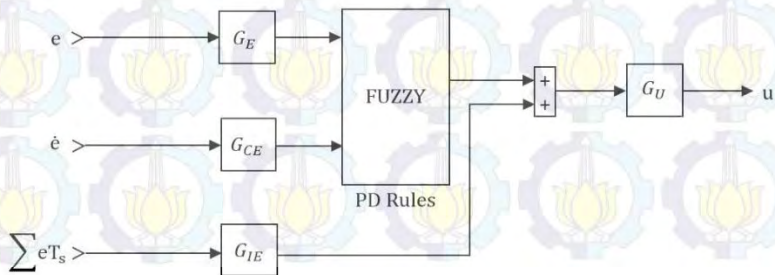
$$u^{tegas} = \frac{\sum_i b_i \mu_{(i)}}{\sum_i \mu_{(i)}} \quad (2.37)$$

dengan  $b_i$  metupakan titik tengah fungsi keanggotaan dan  $\mu_{(i)}$  adalah nilai bobot hasil implikasi operator *fuzzy* yang telah digunakan sebelumnya.

## 1.9 Metode Kontrol Fuzzy PD+I [19]

Kontroler *fuzzy* PD+I terdiri dari kombinasi antara kontroler PID dengan kontroler *fuzzy*. Kontroler *fuzzy* akan bertindak sebagai kontroler utama yang akan mengeluarkan sinyal kontrol pada *plant*, sedangkan *gain* proporsional ( $K_P$ ) dan *gain* derivatif ( $K_d$ ) dari kontroler PID akan masuk ke masukan *fuzzy* dan bertindak sebagai kompensator yang akan memperbaiki keluaran *fuzzy*. Sedangkan *gain* integral ( $K_i$ ) akan langsung ditambahkan pada keluaran *fuzzy*.

Diagram blok kontroler *fuzzy* PD+I dapat dilihat pada Gambar 2.17 berikut:



**Gambar 2.17** Diagram Blok Kontroler Fuzzy PD+I



Sinyal kontrol  $u(n)$  merupakan fungsi dari penjumlahan sinyal eror, delta eror, dan integral eror yang telah dikalikan dengan *gain*  $G_U$ ,

$$u(n) = \left[ f(G_E e(n), G_{CE} \dot{e}(n)) + G_{IE} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] G_U \quad (2.38)$$

atau,

$$u(n) = G_E G_U \left[ e(n) + \frac{G_{CE}}{G_E} \dot{e}(n) + \frac{G_{IE}}{G_E} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] \quad (2.39)$$

dengan membandingkan Persamaan (2.38) dan (2.39), didapatkan hubungan *gain* sebagai berikut,

$$G_E G_U = K_P \quad (2.40)$$

$$G_{CE} G_U = K_d \quad (2.41)$$

$$G_{IE} G_U = K_i \quad (2.42)$$

## BAB 3

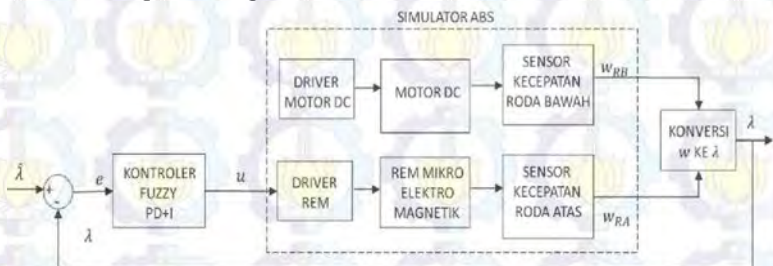
### PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dibahas mengenai perancangan kontroler *fuzzy* PD+I untuk rem elektromagnetik pada Simulator ABS. Bab ini terbagi menjadi tiga bahasan pokok, yakni gambaran umum sistem, simulasi sistem dan implementasi sistem.

#### 1.1 Gambaran Umum Sistem

Simulator ABS merupakan suatu alat yang digunakan untuk menguji slip pada roda tanpa harus menjalankan roda pada permukaan jalan. Secara umum, simulator ABS memiliki dua buah roda. Roda atas mewakili kecepatan putar roda kendaraan sedangkan roda bawah mewakili kecepatan longitudinal kendaraan. Perbedaan kecepatan antara roda atas dengan roda bawah akan menyebabkan slip yang terjadi antara kedua roda tersebut.

Beberapa parameter yang mempengaruhi besarnya slip pada simulator ABS adalah koefisien permukaan roda, perbandingan massa antara roda atas dengan roda bawah, spesifikasi rem magnetik yang digunakan, serta spesifikasi motor DC yang digunakan. Rem elektromagnetik berfungsi untuk mengatur perlambatan kecepatan putar roda atas simulator ABS, sehingga nilai slip yang didapatkan sesuai dengan nilai slip yang diinginkan, yakni 20%. Sedangkan motor DC digunakan untuk memutar roda bawah simulator ABS. Gambar 3.1 berikut merupakan diagram blok sistem simulator ABS:



**Gambar 3.1** Diagram Blok Sistem Simulator ABS

Penggunaan kontroler *fuzzy* PD+I bertujuan untuk mengatur besar slip antara roda atas dan roda bawah yang tidak linier pada rentang 0,2.

Kontroler *fuzzy* akan mengatasi respon *plant* yang tidak linier dan performanya akan diperbaiki oleh  $K_p$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$ .

## 1.2 Perancangan Perangkat Keras

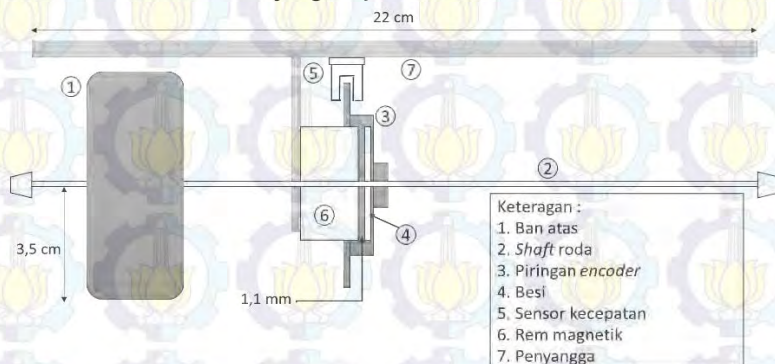
Simulator ABS terdiri dari berbagai perangkat keras, baik komponen mekanik, maupun komponen elektrik. Perancangan semua komponen tersebut harus terintegrasi secara baik antar komponen, sesuai dengan spesifikasi masing-masing komponen sehingga simulator ABS dapat bekerja secara baik.

### 1.2.1 Perancangan Mekanik

Simulator ABS memiliki beberapa komponen mekanik yang memiliki spesifikasi dan fungsi masing-masing untuk menunjang performa kerja simulator ABS. Beberapa komponen mekanik yang perlu diperhatikan pada simulator ABS adalah roda atas, roda bawah, motor DC, dan rem elektromagnetik.

#### 3.2.1.1 Roda Bebas Atas

Roda bebas pada simulator ABS mewakili roda mobil yang berputar pada kendaraan. Roda bebas memiliki jari-jari roda sebesar 3,5 cm dan lebar 2 cm dengan panjang *shaft* poros 22 cm dan ditopang dengan *frame* simulator ABS di kedua ujung *shaft*.



**Gambar 3.2** Konstruksi Mekanik Roda Bebas Atas

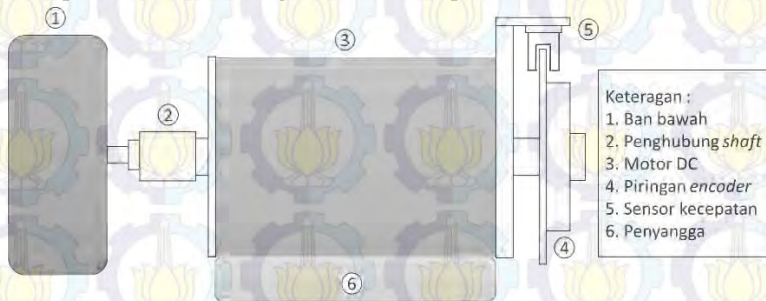
Pada roda bebas, dipasang sebuah sensor kecepatan dan rem elektromagnetik. Sensor kecepatan digunakan untuk mengetahui kecepatan putar roda, sedangkan rem elektromagnetik digunakan untuk



memperlambat putaran roda atas sehingga timbul slip antara roda atas dengan roda bawah. Piringan *encoder* diletakkan melekat pada poros roda atas dan pada sisi atas piringan diletakkan sensor kecepatan. Pada bagian tengah piringan *encoder* terdapat piringan besi yang akan bergesekan dengan rem elektromagnetik saat rem aktif.

### 3.2.1.2 Roda Bawah dan Motor DC

Motor DC digunakan sebagai penggerak roda bawah yang berperan sebagai kecepatan longitudinal kendaraan. Ukuran roda bawah sama dengan ukuran roda atas, sehingga luas permukaan yang saling bersinggungan antara roda atas dan roda bawah maksimal. Roda bawah dipasang pada poros sumbu putar motor DC. Gambar 3.3 dibawah merupakan sketsa rancangan roda bawah pada simulator ABS:



**Gambar 3.3** Konstruksi Mekanik Roda Bawah dan Motor DC

Berat roda dan roda atas berbeda. Berat roda bawah sekitar 130,68 gram, sedangkan berat roda atas sekitar 25 gram. Perbedaan berat antara bawah atas dengan roda atas yang besar bertujuan untuk memberikan gaya inersia atau gaya kelembaman yang besar pada roda bawah saat motor DC berhenti memutar roda bawah. Gaya inersia pada roda bawah simulator ABS tersebut berpengaruh pada perlambatan roda bawah akibat gesekan pada permukaan antar roda. Hal tersebut mirip dengan gaya inersia pada roda kendaraan yang menanggung beban massa kendaraan pada saat kendaraan mengalami proses pengereman pada kecepatan tinggi.

Motor DC yang digunakan untuk memutar roda bawah pada simulator ABS ini adalah motor DC produksi Nisca Corporation dengan spesifikasi yang tertera pada Tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1** Spesifikasi Motor DC [20]

Tipe motor DC	<i>Brush</i>
Tegangan pengoprasian motor DC	24 Volt
<i>Bearing</i> motor DC	<i>Ball bearing</i>
Berat motor DC	700 gram
Magnet motor DC	2 <i>pole</i> magnet permanen
Kecepatan motor DC	2500 rpm
Arus motor DC	1,123 A
Daya keluaran motor DC	19,15 W
Efisiensi motor DC	71,1%

### 3.2.1.3 Rem Elektromagnetik

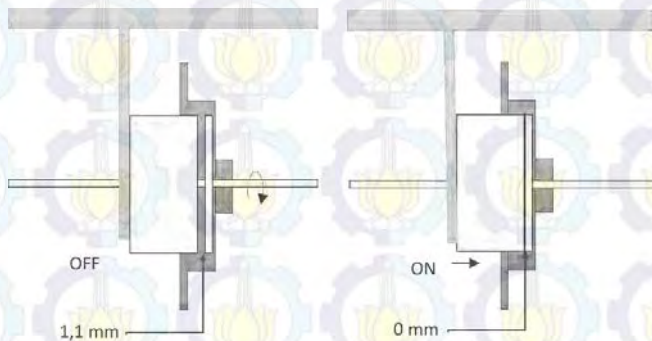
Rem elektromagnetik yang digunakan pada tugas akhir ini adalah rem mikro elektromagnetik berjenis kering dengan satu piringan besi (*dry-type single-plate*) produksi Shinko Electric. Rem elektromagnetik berperan untuk mengatur perlambatan kecepatan roda atas sehingga terjadi proses pengerman dan timbul slip akibat perbedaan kecepatan putar antara roda atas dengan roda bawah. Spesifikasi rem elektromagnetik yang digunakan pada roda atas simulator ABS ini tertera pada Tabel 3.2 berikut:

**Tabel 3.2** Spesifikasi Rem Elektromagnetik

Jenis rem	<i>Dry-type single-plate</i>
Tegangan pengoprasian rem	0-12 Volt DC
Daya pengoperasian rem	3,3 Watt
Produksi	Shinko Electric.co.ltd
Ukuran diameter rem	Luar : 2,7 cm Dalam : 1,1cm
Tinggi rem	1,5 cm

Rem elektromagnetik akan aktif saat diberi tegangan berbentuk PWM dari *driver* rem elektromagnetik. Kumparan didalam magnet akan menimbulkan medan magnet sesuai dengan *duty cycle* tegangan PWM yang masuk sehingga menyebabkan rem tertarik dan bergesekan ke arah piringan besi yang melekat pada piringan *encoder*. Kuat medan magnet yang timbul pada rem tergantung besarnya *duty cycle* dari sinyal PWM

yang masuk. Ilustrasi cara kerja rem elektromagnetik dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut:



**Gambar 3.4** Prinsip Kerja Rem Elektromagnetik

### 1.2.2 Perancangan Elektronik

Komponen elektronik penting dalam perancangan simulator ABS, sebab komponen elektronik berpengaruh dalam pengiriman dan penerimaan sinyal masukan maupun sinyal keluaran sistem. Beberapa komponen elektronik yang perlu diperhatikan dalam perancangan simulator ABS adalah *driver* motor DC, *driver* rem elektromagnetik, sensor kecepatan, dan Arduino UNO.

#### 3.2.2.1 Driver Motor DC

*Driver* motor DC digunakan untuk menjalankan motor DC dengan suplai arus yang sesuai dengan spesifikasi motor DC tersebut. *Driver* motor DC tesusun dari beberapa komponen elektronik yang dirangkai pada sebuah *board* PCB, yang tertera pada Tabel 3.3 dibawah:

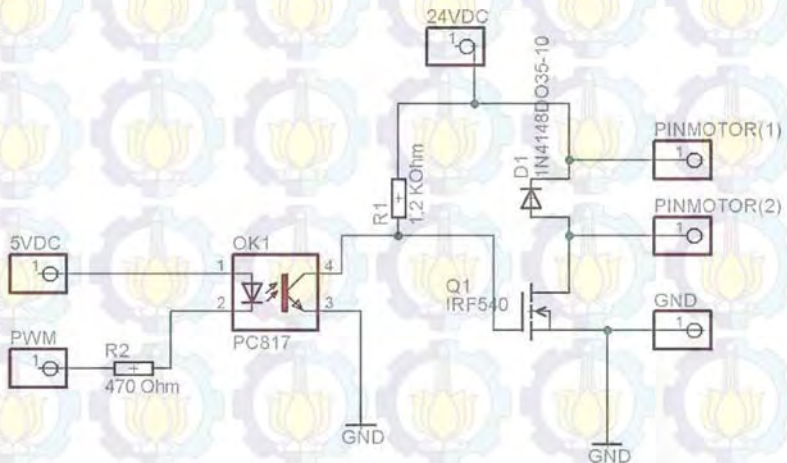
**Tabel 3.3** Komponen *Driver* Motor DC

Komponen	Jumlah
<i>Optocoupler</i> PC817	1 buah
<i>N-Channel Power</i> MOSFET IRF240	1 buah
Dioda 1N414800	1 buah
Resistor 1200 Ohm	1 buah
Resistor 470 Ohm	1 buah



Tegangan suplai motor DC menggunakan suplai tegangan 24 Volt DC. *Optocoupler* pada *driver* berfungsi untuk memisahkan rangkaian Arduino UNO dengan rangkaian motor DC, sehingga menghindari terjadinya *overcurrent* atau arus berlebih pada Arduino UNO saat terjadi hubungan arus pendek pada rangkaian yang dapat merusak *board* Arduino UNO.

Pin 1 *optocoupler* dimasukkan tegangan *float* 5 Volt dari Arduino UNO, pin 2 dimasukkan sinyal PWM dari Arduino UNO, pin 3 dihubungkan ke *ground*, dan pin 4 dihubungkan *base* transistor MOSFET. Saat sinyal *low* dari *duty cycle* PWM yang dikirim Arduino UNO masuk pada pin 2 *optocoupler*, LED pada *transmitter optocoupler* akan mengirimkan sinyal cahaya pada *receiver optocoupler*, sehingga ada arus yang mengalir dari kaki kolektor ke kaki *emitter* pada *phototransistor optocoupler*. Akibat arus yang mengalir pada kaki *emitter optocoupler*, arus dari tegangan suplai mengalir ke kaki *ground* dan tidak ada arus *drain* ke motor DC, sehingga motor DC tidak aktif. Gambar 3.5 dibawah merupakan gambar rangkaian *driver* motor DC:



**Gambar 3.5** Rangkaian *Driver* Motor DC

### 3.2.2.2 *Driver* Rem Elektromagnetik

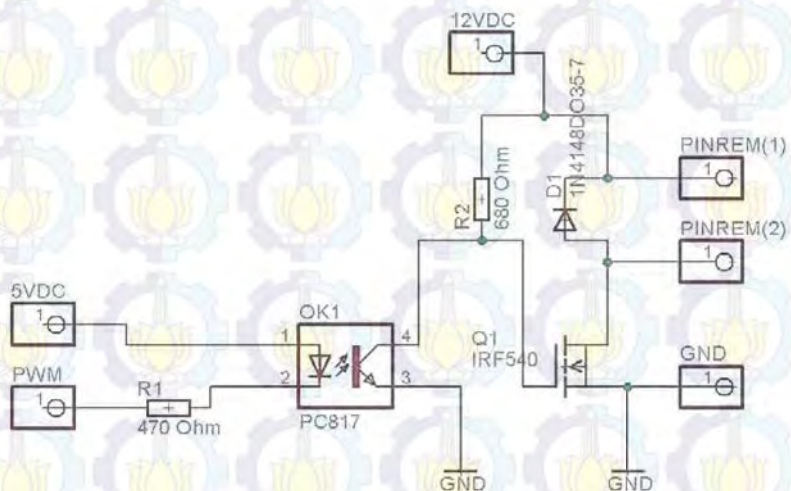
*Driver* rem elektromagnetik digunakan untuk menjalankan rem dengan suplai arus yang sesuai dengan spesifikasinya yang dibutuhkan. *Driver* rem elektromagnetik disusun dari beberapa komponen elektronik

yang dirangkai pada sebuah *board* PCB. Tabel 3.4 berikut merupakan komponen-komponen penyusun *driver* rem elektromagnetik:

**Tabel 3.4** Komponen *Driver* Rem Elektromagnetik

Komponen	Jumlah
<i>Optocoupler</i> PC817	1 buah
<i>N-Channel Power MOSFET</i> IRF240	1 buah
Dioda 1N414800	1 buah
Resistor 680 Ohm	1 buah
Resistor 470 Ohm	1 buah

Cara kerja rangkaian *driver* rem elektromagnetik sama dengan rangkaian *driver* motor dc. Yang membedakan antara *driver* motor dc dengan *driver* rem elektromagnetik adalah suplai tegangan yang digunakan. Suplai tegangan *driver* rem menggunakan tegangan 12 Volt DC. Pada *driver* elektromagnetik, pin 1 *optocoupler* dihubungkan pada pin PWM nomor 9 pada Arduino UNO. Gambar 3.6 berikut merupakan gambar rangkaian *driver* rem elektromagnetik:



**Gambar 3.6** Rangkaian *Driver* Rem Elektromagnetik

### 3.2.2.3 Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan yang digunakan adalah modul sensor kecepatan dengan komparator 393. Sensor kecepatan terletak pada roda atas dan roda bawah. Sensor kecepatan mendeteksi lubang pada tiap sisi luar piringan *encoder* yang berputar seporos dengan roda, dengan menggunakan *optocoupler*. Sensor kecepatan pada roda atas akan mengukur kecepatan putar roda kendaraan, sedangkan sensor kecepatan pada roda bawah mengukur kecepatan longitudinal kendaraan.

LED pada *transmitter optocoupler* akan mengeluarkan cahaya infra merah dan akan diterima oleh *phototransistor* pada *receiver optocoupler*. Cahaya infra merah yang menembus piringan *encoder* dan diterima *phototransistor* akan diubah oleh sensor kecepatan menjadi dua pulsa keluaran, yakni pulsa digital 1 maupun pulsa analog 5 Volt. Sedangkan cahaya infra merah yang terhalang oleh piringan *encoder* akan diubah oleh sensor kecepatan menjadi pulsa digital 0 maupun pulsa analog 0 Volt. Sensor kecepatan memiliki empat buah pin dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Pin VCC : tegangan suplai 3,3-12 volt
- Pin GND : *ground*
- Pin DO : keluaran sinyal digital
- Pin AO : keluaran sinyal analog

Pada sistem simulator ABS, keluaran sensor yang digunakan adalah keluaran analog pin AO. Pin VCC sensor terhubung pada tegangan suplai 5 Volt DC Arduino UNO, pin GND sensor terhubung pada *ground* Arduino UNO, dan pin AO sensor terhubung pada pin *input* Arduino UNO. Spesifikasi sensor kecepatan dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut:

**Tabel 3.5** Spesifikasi Sensor Kecepatan [13]

Komparator yang digunakan	LM393
Tegangan pengoprasian	3,3 - 12 V
Format keluaran	<i>Digital switching</i> 1 0
Lebar celah <i>optocoupler</i>	5 mm
Sinyal keluaran komparator	15 mA
Dimensi modul	3,2 cm x 1.4 cm
Lubang pada piringan <i>encoder</i>	55 buah
Diameter piringan <i>encoder</i>	6,4 cm
Lebar piringan <i>encoder</i>	2 mm



[illegible]

**Gambar 3.7** Rangkaian Sensor Kecepatan [13]

### 1.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam pembuatan simulator ABS adalah program Arduino UNO untuk akuisisi data pada sensor kecepatan dan membuat program *driver* motor DC sekaligus rem elektromagnetik serta MATLAB untuk perancangan kontroler, simulasi dan implementasi sistem.

### 1.3.1 Software Arduino UNO 1.6.3

Simulator ABS memiliki dua Arduino UNO dengan fungsi masing-masing. Arduino UNO yang pertama digunakan untuk mendapatkan data dari sensor dan mengirimkan sinyal kontrol dari kontroler ke rem elektromagnetik, sedangkan Arduino UNO yang kedua digunakan untuk menjalankan motor DC.

Program Arduino untuk sensor kecepatan memiliki suatu persamaan agar mengubah sinyal masukan sensor menjadi format rotasi per menit (RPM). Persamaan (3.1) berikut merupakan konversi sinyal masukan sensor (*pulse in* saat keadaan LOW) menjadi RPM:

$$RPM = \frac{60}{pulseinLOW \cdot 110} 1000000 \quad (4.1)$$

Nilai 110 adalah jumlah lubang piringan *encoder* yakni 55 buah ditambah sisi tanpa lubang, 60 adalah jumlah detik dalam satu menit, dan 1.000.000 adalah jumlah mikro detik dalam satu detik. Program Arduino untuk sensor kecepatan dapat dilihat di lampiran A-1.

Program Arduino pada rem elektromagnetik menggunakan besar *duty cyle* sinyal PWM yang masuk. Saat rem elektromagnetik aktif, motor DC akan mati, sehingga pengereman terjadi sesaat setelah motor DC mati hingga berhenti. Program Arduino pada motor DC dan rem elektromagnetik dapat dilihat pada Lampiran B.

### 1.3.2 Software MATLAB R2103a

Program MATLAB digunakan untuk identifikasi *plant*, merancang kontroler yang akan digunakan, serta melakukan implementasi pada *plant* simulator ABS. *Software* MATLAB memiliki fasilitas yang mendukung dalam merancang model *plant* dan kontroler yang digunakan serta melakukan simulasi *plant* tersebut. Selain melakukan simulasi, program MATLAB juga dapat digunakan sebagai program implementasi pada *real plant* dengan menggunakan blok diagram komunikasi port pada Simulink.

Simulink merupakan suatu bagian dari *software* MATLAB yang digunakan untuk simulasi suatu sistem maupun implementasi dalam format diagram. Ada beberapa fitur penting Simulink yang digunakan untuk menunjang pengerjaan Tugas Akhir ini, diantaranya *system identification toolbox*, *fuzzy toolbox*, dan lain sebagainya.

## 1.4 Proses Identifikasi dan Pemodelan *Plant*

*Plant* simulator ABS akan dianggap sebagai *black box* dengan parameter-parameter *plant* yang tidak diketahui. *Plant* akan diberi sinyal masukan dan diukur sinyal keluaran *plant* sehingga dapat dilakukan perhitungan terhadap parameter-parameter yang tidak diketahui sebelumnya. Metode identifikasi yang akan digunakan pada simulator ABS ini adalah metode *least square* dengan bentuk *auto regressive* (AR) atau dengan bentuk *auto regressive moving average* (ARMA), tergantung nilai *root mean square error* (RMSE) hasil pemodelan.

### 1.4.1 Pengujian Kecepatan Motor DC

Pengujian kecepatan motor DC dilakukan untuk mengetahui pengaruh sinyal PWM yang diberikan terhadap kecepatan motor DC dengan mengubah persentase PWM rem. Dengan membuat variasi penurunan persentase PWM rem tiap 10 % dari 10% sampai dengan 100 % didapatkan data hubungan antara kecepatan motor DC dengan perubahan *duty cyle* PWM motor yang tertera pada Tabel 3.6:

**Tabel 3.6** Hubungan Kecepatan Motor DC dengan *Duty Cyle* PWM

<i>Duty Cyle</i> Sinyal PWM Motor DC	Kecepatan Motor DC dengan Pengukuran Sensor Kecepatan (RPM)
10 %	573
20 %	1224
30 %	1621
40 %	1854
50 %	1994
60 %	2097
70 %	2155
80 %	2173
90 %	2220
100 %	2313

### 1.4.2 Pengujian *Open Loop* Simulator ABS

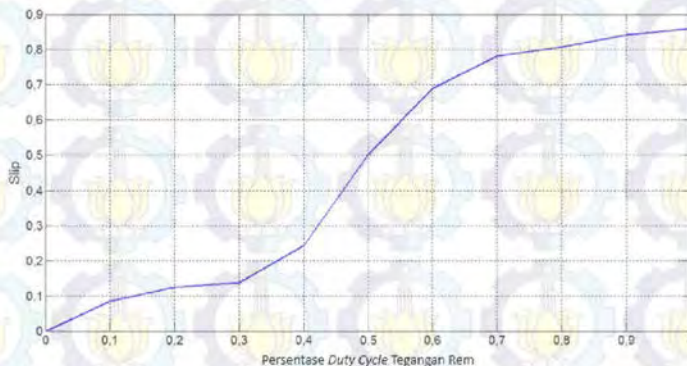
Pada pengujian *open loop* simulator ABS, digunakan beberapa titik uji pengereman dalam bentuk persentase *duty cycle* sinyal PWM yang masuk pada rem elektromagnetik serta dilakukan pengukuran nilai rata-rata slip yang timbul selama pengereman berlangsung. Perhitungan slip dilakukan melalui perbedaan nilai kecepatan putar yang terjadi pada roda atas dan kecepatan putar roda bawah simulator ABS dengan menggunakan Persamaan (2.1). Kecepatan yang digunakan pada pengujian *open loop* adalah pada *duty cycle* 70%, 80%, 90% dan 100% dari sinyal PWM yang masuk pada motor DC. Dengan merujuk pada Tabel 3.6 diketahui nilai penggunaan sinyal PWM dengan persentase 70%, 80%, 90%, dan 100% masing-masing secara berurutan adalah 2155 RPM, 2173 RPM, 2220 RPM, dan 2313 RPM. Tabel 3.7 dibawah merupakan data hasil pengujian *open loop plant* simulator ABS dengan kenaikan tiap 10% *duty cycle* untuk sinyal PWM rem elektromagnetik:



**Tabel 3.7** Data Pengujian Tegangan Rem dan Rata-Rata Slip

Tegangan Rem	Slip dengan Variasi Kecepatan Awal Motor DC			
	2313 (RPM) /100%	2220 (RPM) /90%	2193 (RPM) /80%	2155 (RPM) /70%
10%	0,12934	0,08476	0,16076	0,38118
20%	0,14616	0,12543	0,17403	0,38464
30%	0,17498	0,13771	0,21248	0,43337
40%	0,23304	0,24226	0,28326	0,37228
50%	0,48866	0,50346	0,44012	0,40046
60%	0,66523	0,68928	0,66226	0,62183
70%	0,76070	0,78347	0,74383	0,71080
80%	0,82027	0,80893	0,79062	0,82936
90%	0,81499	0,84319	0,87207	0,85293
100%	0,83794	0,86017	0,86869	0,85408

Dari Tabel 3.7 diatas, rem elektromagnetik dapat bekerja secara optimal pada slip 0,2 pada kecepatan 80% - 100% kecepatan maksimum motor DC, sedangkan untuk 70% kebawah, rata-rata slip yang diperoleh lebih dari 0,2.



**Gambar 3.8** Perbandingan Slip dengan Persentase *Duty Cycle* Tegangan Rem pada Kecepatan 2220 RPM

Dalam Tugas Akhir ini, penulis memilih kecepatan awal 2220 RPM atau 90% *duty cycle* pada motor DC. Gambar 3.8 diatas merupakan grafik perbandingan slip roda dengan persentase *duty cycle* sinyal PWM yang merepresentasikan tegangan rem elektromagnetik yang dipakai.

#### 1.4.3 Metode Pemodelan Plant

Metode yang digunakan adalah metode *least square* dalam bentuk persamaan *auto regressive* (AR). Pemodelan dilakukan menggunakan fitur *system identification toolbox* pada Simulink MATLAB. Tabel 3.8 dan Tabel 3.9 berikut merupakan hasil identifikasi dalam model *auto regressive* (AR) dan *auto regressive moving average* (ARMA):

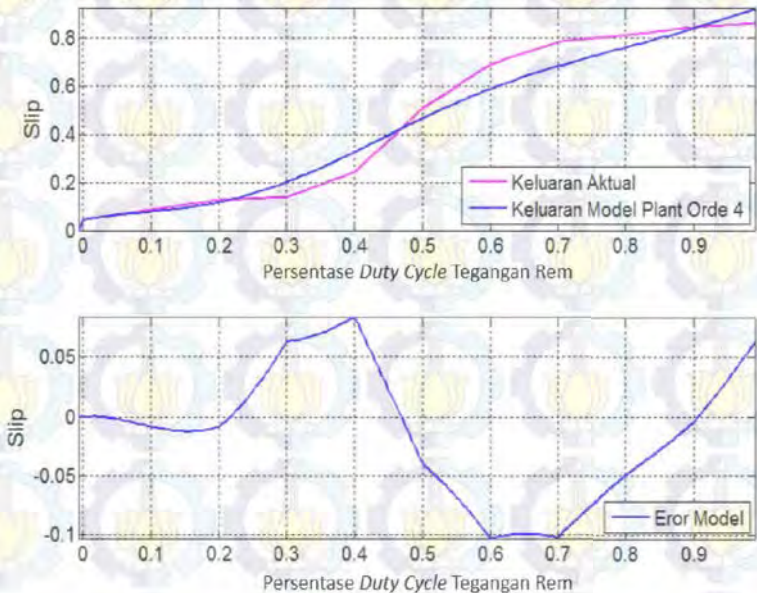
**Tabel 3.8** Hasil Pemodelan AR Plant Simulator ABS

Orde na	Model AR	RMSE (%)
2	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,0067605z}{z^2 - 1,6689z + 0,67385}$	11,69
3	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,0020206z^2}{z^3 - 1,9764z^2 + 0,97378z + 0,0047081}$	5,61
4	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,0020206z^3}{z^4 - 1,95z^3 + 0,925z^2 + 0,00223z + 0,0046}$	5,58

**Tabel 3.9** Hasil Pemodelan ARMA Plant Simulator ABS

Orde		Model ARMA	RMSE (%)
na	nb		
3	2	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,0091197z^2 - 0,0072086z}{z^3 - 1,976z^2 + 0,9737z + 0,0038}$	6,16
4	2	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,007647z^3 - 0,00569z^2}{z^4 - 1,95z^3 + 0,93z^2 + 0,023z + 0,004}$	6,02
4	3	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,007647z^3 - 0,00569z^2 - 0,003z}{z^4 - 1,95z^3 + 0,925z^2 + 0,023z + 0,004}$	6,02

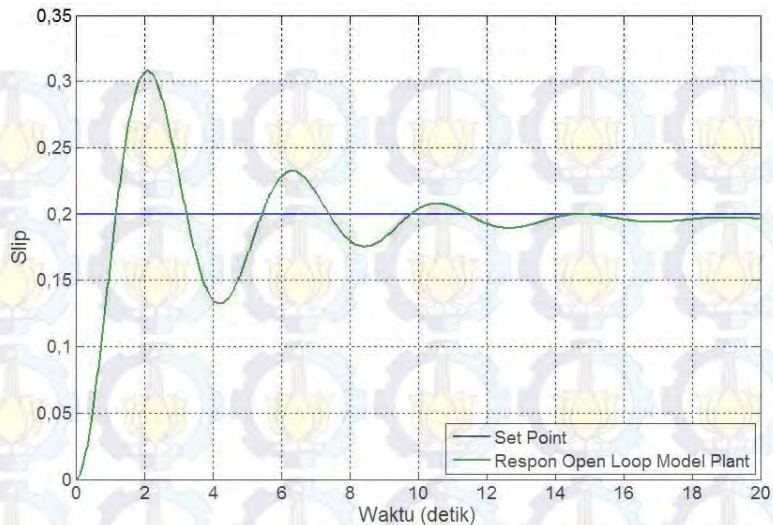
Dari perbandingan nilai RMSE pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9, AR orde 4 merupakan model dengan nilai error terkecil, sehingga model yang diambil adalah model AR orde 4. Gambar 3.9 berikut merupakan perbandingan hasil pemodelan *plant* AR orde 4 dengan *real plant*:



**Gambar 3.9** Hasil Pemodelan AR Orde 4 dan Error Model

Setelah mendapatkan model matematika *plant*, langkah selanjutnya adalah menguji sinyal *step* pada model matematika *plant* tersebut. Pengujian sinyal *step* bertujuan untuk mengetahui respon *transient* dan respon *steady state* sistem. Respon *transient* merupakan respon *plant* saat kondisi inisial sampai dengan kondisi final, sedangkan respon *steady state* sistem merupakan respon *plant* saat kondisi final sampai waktu tak hingga. Respon *transient* dan respon *steady state* penting dalam menentukan kestabilan sistem apabila diberikan sinyal *step*. Gambar 3.10 dibawah merupakan hasil pengujian sinyal *step* pada model matematika *plant* yang telah didapatkan sebelumnya:





**Gambar 3.10** Respon Step Model Plant

## 1.5 Perancangan Kontroler Fuzzy PD+I

Sebelum merancang suatu kontroler, penentuan kriteria respon *transient* dan *steady state* sistem yang diinginkan harus dilakukan terlebih dahulu. Kriteria respon sistem yang diinginkan adalah *rise time* sistem kurang dari 1 detik, *settling time* kurang dari 2 detik, tanpa *delay time*, maksimum *overshoot* kurang dari 10%, dan tidak ada *error steady state*.

Perancangan kontroler fuzzy PD+I terbagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah perancangan kontroler fuzzy dan bagian kedua adalah perancangan gain  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  pada kontroler fuzzy yang telah dibuat sebelumnya.

### 1.5.1 Perancangan Kontroler Fuzzy

Tipe kontroler fuzzy yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah tipe mamdani. Tahap awal dalam perancangan kontroler fuzzy adalah penentuan objektif kontrol sistem. Objektif kontrol pada sistem pengaturan slip simulator ABS adalah mengatur agar nilai slip tetap pada nilai yang ditentukan, yakni 0,2. Tahap selanjutnya adalah menentukan masukan dan keluaran kontroler fuzzy. Tahap berikutnya adalah menentukan basis aturan kontroler fuzzy. Tahap yang terakhir adalah menentukan sistem inferensi fuzzy.

### 3.5.1.1 Masukan dan Keluaran Kontroler Fuzzy

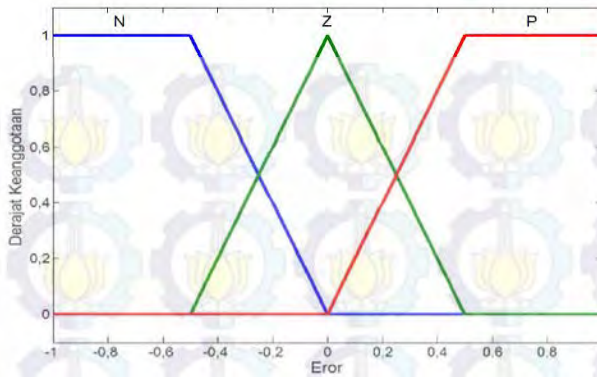
Kontroler pada sistem pengaturan slip simulator ABS memiliki dua masukan dan satu keluaran. Masukan kontroler yang pertama adalah eror slip ( $e(t)$ ) dan yang kedua adalah delta eror slip ( $de(t)$ ), sedangkan keluaran kontroler adalah persentase *duty cycle* tegangan rem ( $u(t)$ ). Tabel 3.10 berikut merupakan rentang daerah himpunan fuzzy untuk masukan dan keluaran kontroler fuzzy:

**Tabel 3.10** Rentang Daerah Himpunan Fuzzy

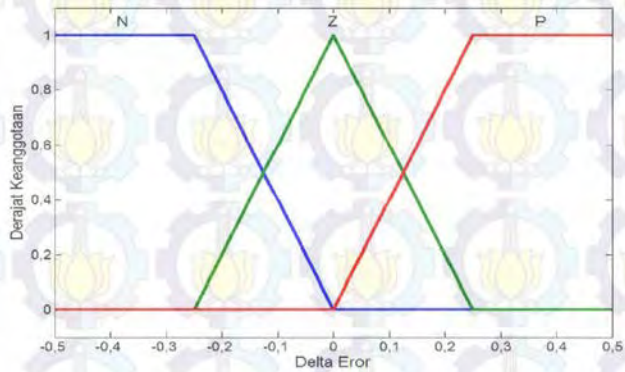
Error Slip		Delta Error slip		Persentase <i>Duty Cycle</i> Tegangan Rem	
N	-1 – 0	N	-0,5 – 0	KS	-1 – 0,1
Z	-0,5 – 0,5	Z	-0,25 – 0,25	K	0,0 – 0,2
P	0 – 1	P	0 – 0,5	M	0,1 – 0,3
				B	0,2 – 0,4
				BS	0,3 – 1

Himpunan keanggotaan masukan eror slip terbagi menjadi tiga buah fungsi keanggotaan, yakni Negatif (N), Zero (Z), dan Positif (P). Himpunan keanggotaan masukan eror slip dapat dilihat pada Gambar 3.11. Himpunan keanggotaan masukan delta eror slip terbagi menjadi tiga buah fungsi keanggotaan, yakni Negatif (N), Zero (Z), dan Positif (P). Himpunan keanggotaan masukan delta eror slip dapat dilihat pada Gambar 3.12. Himpunan keanggotaan keluaran persentase *duty cycle* tegangan rem terbagi menjadi lima buah fungsi keanggotaan, yakni Kecil Sekali (KS), Kecil (K), *Medium* (M), Besar (B), dan Besar Sekali (BS). Himpunan keanggotaan keluaran persentase *duty cycle* tegangan rem dapat dilihat pada Gambar 3.13.

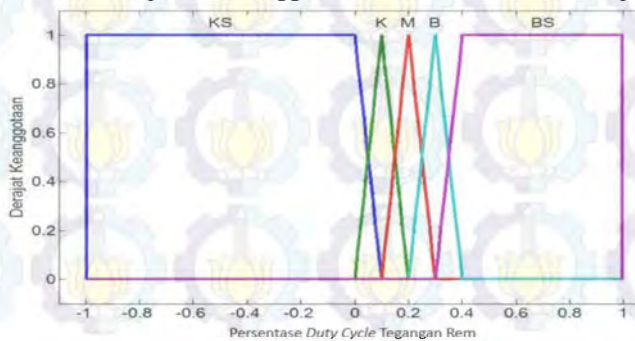
Rentang nilai eror slip bernilai antara -1 sampai 1. Nilai rentang tersebut dipilih karena nilai slip 1 adalah saat kecepatan putar roda kendaraan nol, sedangkan nilai slip -1 adalah saat kecepatan longitudinal kendaraan mendekati nol, sesuai dengan Persamaan (2.1). Rentang nilai persentase *duty cycle* tegangan rem yang digunakan dari -1 sampai 1. Nilai rentang tersebut dipilih agar besar fungsi keanggotaan KS dan BS tidak berbeda jauh, sehingga basis aturan yang memiliki konsekuen KS memiliki nilai pembobotan yang dapat mengimbangi nilai pembobotan BS.



**Gambar 3.11** Himpunan Keanggotaan Masukan Error Slip



**Gambar 3.12** Himpunan Keanggotaan Masukan Delta Error Slip



**Gambar 3.13** Himpunan Keanggotaan Keluaran *Fuzzy*



### 3.5.1.2 Perancangan Basis Aturan Fuzzy

Pengetahuan awal yang perlu diketahui dalam perancangan kontroler fuzzy pada *plant* simulator ABS adalah sebagai berikut:

- Nilai slip yang diinginkan adalah 0,2,
- $e(t)$  positif saat keluaran slip kurang dari 0,2 (*set point*),
- $de(t)$  positif saat *gradient* perubahan error positif,
- $e(t)$  negatif saat keluaran slip lebih dari 0,2 (*set point*),
- $de(t)$  negatif saat *gradient* perubahan error negatif,
- Nilai total sinyal kontrol  $u(t)$  selalu positif dari rentang kerja tegangan rem elektromagnetik.

Pengetahuan awal diatas akan diubah kedalam basis aturan kontroler fuzzy secara umum seperti berikut:

- Saat  $e(t)$  negatif dan  $de(t)$  negatif, atau saat  $e(t)$  zero dan  $de(t)$  negatif, atau saat  $e(t)$  negatif dan  $de(t)$  zero, maka sinyal kontrol yang diberikan kecil, agar respon sistem tidak melewati *set point*,
- Saat  $e(t)$  positif dan  $de(t)$  negatif, atau saat  $e(t)$  negatif dan  $de(t)$  positif, atau saat  $e(t)$  zero dan  $de(t)$  zero, maka sinyal kontrol yang diberikan sedang untuk mempertahankan respon sistem pada *set point*,
- Saat  $e(t)$  positif dan  $de(t)$  positif, atau saat  $e(t)$  zero dan  $de(t)$  negatif, atau saat  $e(t)$  negatif dan  $de(t)$  zero, maka sinyal kontrol yang diberikan besar untuk mempercepat *rise time* respon sistem simulator ABS.

Setelah mendapatkan basis aturan, basis aturan tersebut diubah menjadi format aturan *if-then*. Berikut merupakan salah satu contoh basis aturan kontroler fuzzy sistem pengaturan slip simulator ABS:

**If** error adalah N **and** delta error adalah N **Then** presentase *duty cycle* tegangan rem adalah KS.

Jumlah basis aturan fuzzy untuk pengaturan slip simulator ABS sebanyak 9 buah aturan. Seluruh basis aturan pada kontroler fuzzy untuk sistem pengaturan slip simulator ABS dapat dilihat pada Tabel 3.11 dibawah.

Metode defuzzifikasi yang digunakan untuk menghitung agregasi hasil implikasi fuzzy adalah metode *centroid* atau *center average*, yakni metode yang menghitung titik tengah dari hasil implikasi himpunan

keluaran *fuzzy*. Persamaan matematika untuk metode *center average* dapat dilihat pada Persamaan (2.37).

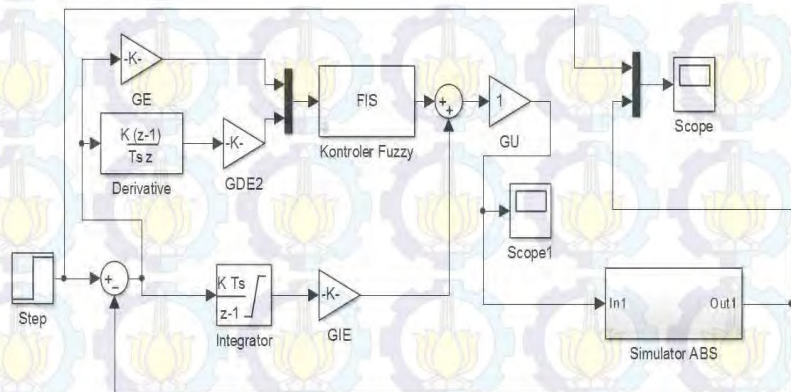
**Tabel 3.11** Basis Aturan Kontroler *Fuzzy*

$e(t) \backslash de(t)$	Negatif	Zero	Positif
Negatif	KS	K	M
Zero	K	M	B
Positif	M	B	BS

### 1.5.2 Perancangan Kontroler *Fuzzy* PD+I

Kontroler *fuzzy* yang telah dirancang sebelumnya diberikan *gain*  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$ . Penambahan *gain*  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  tersebut bertujuan untuk memperbaiki sinyal masukan pada kontroler *fuzzy* agar respon sinyal kontrol menjadi lebih baik.

Penentuan nilai awal  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  dapat ditentukan menggunakan metode *trial and error*. Berdasarkan persamaan Dari *trial and error*, didapatkan nilai  $G_U$  sebesar 1, nilai  $G_E$  sebesar 3,95, nilai  $G_{CE}$  sebesar 0,45, dan nilai  $G_{IE}$  sebesar 0,0336. Gambar 3.14 berikut merupakan blok Simulink untuk tahap simulasi kontroler *fuzzy* PD+I:



**Gambar 3.14** Blok Simulink Kontroler *Fuzzy* PD+I

Pada tahap implementasi, dilakukan beberapa penambahan blok *Instrument Control Toolbox* untuk melakukan pengiriman dan penerimaan data secara *online* pada *real plant*. Skema blok Simulink kontroler *fuzzy* PD+I untuk implementasi terlampir pada Lampiran B.





## BAB 4

### PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab Pengujian dan Analisis menampilkan hasil simulasi dan implementasi sistem simulator ABS. Pada bab ini terdapat tiga bahasan pokok, yakni gambaran umum pengujian sistem, simulasi sistem dan implementasi sistem.

#### 1.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem

Pengujian yang dilakukan terhadap sistem pengaturan *slip* simulator ABS bertujuan untuk mengetahui respon sistem dengan menggunakan kontroler *fuzzy* PD+I hasil rancangan pada Bab 3 sebelumnya. Pada tahap pengujian dan analisis ini, dilakukan uji simulasi sistem dengan menggunakan kontroler PID, *fuzzy*, dan *fuzzy* PD+I. Hasil simulasi pengujian sistem akan dianalisis berapa besar nilai *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, serta *error steady state* dari masing-masing pengujian, baik pengujian menggunakan kontroler PID, kontroler *fuzzy*, maupun kontroler *fuzzy* PD+I.

#### 1.2 Simulasi Sistem

Simulasi sistem dilakukan sebelum melakukan implementasi kontroler pada *real plant*. Simulasi sistem bertujuan untuk mendapatkan nilai respon *transient* dan respon *steady state* sistem yang diharapkan, yakni nilai *rise time* sistem kurang dari 1 detik, *settling time* kurang dari 2 detik, tanpa *delay time*, maksimum *overshoot* kurang dari 10%, dan tidak ada *error steady state*.

Nilai *rise time* yang kecil menunjukkan respon kerja rem elektromagnetik yang cepat. Nilai *settling time* yang kecil menandakan bahwa proses pengereman rem elektromagnetik menghasilkan nilai *slip* yang sesuai dengan set point secara cepat. Nilai maksimum *overshoot* kurang 10% menunjukkan rentang *slip* yang boleh terjadi hanya sebesar 0,22. Simulasi sistem dilakukan menggunakan waktu sampling sebesar 0,03 detik sesuai dengan spesifikasi sensor kecepatan dalam pengambilan data.

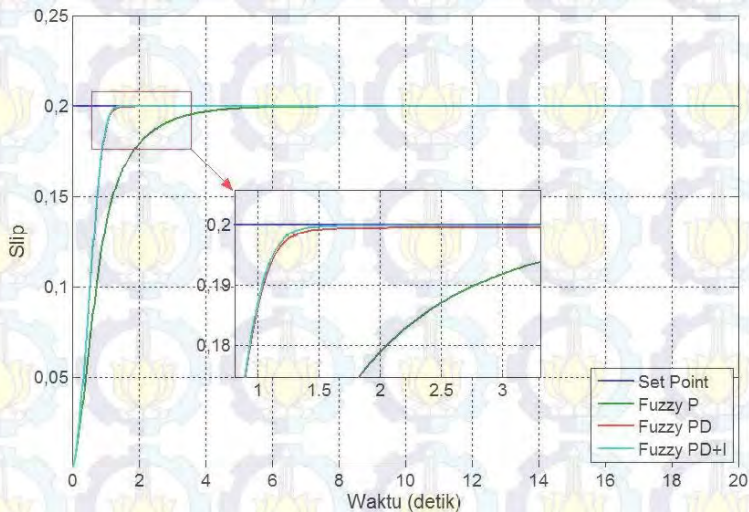
Simulasi yang dilakukan pada sistem simulator ABS adalah sebagai berikut:

1. Simulasi sistem menggunakan kontroler *fuzzy* PD+I,
2. Perbandingan kontroler *fuzzy* PD+I dengan kontroler *fuzzy*,
3. Perbandingan kontroler *fuzzy* PD+I dengan kontroler PID.

Selain membandingkan respon sistem dengan kontroler PID, *fuzzy*, dan *fuzzy* PD+I, dilakukan pula perbandingan sinyal kontrol dari masing-masing kontroler. Sinyal kontroler yang dikeluarkan masing-masing kontroler harus sesuai dengan rentang persentase *duty cycle* PWM yang dapat masuk ke rem elektromagnetik.

### 1.2.1 Simulasi Kontroler *Fuzzy* PD+I

Perbandingan hasil simulasi sistem dengan menggunakan kontroler *fuzzy* PD+I, serta bagaimana pengaruh dari nilai  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  pada kontroler *fuzzy* PD+I dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:



**Gambar 4.1** Respon Sistem dengan Kontroler *Fuzzy* PD+I

Dari Gambar 4.1 diatas terlihat pengaruh penambahan  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  pada kontroler *fuzzy* PD+I. Pengaruh nilai  $K_P$  sebesar 3,59 dan nilai  $K_i$  sebesar 0,45 pada kontroler *fuzzy* PD+I adalah dapat mempercepat *rise time* dan *settling time* pada sistem, sedangkan pengaruh penambahan  $K_i$  sebesar 0,0366 adalah menghilangkan *error steady state* sistem sebesar 0,0004.

Berikut merupakan penentuan nilai *rise time* (5%-95%), *settling time* ( $\pm 5\%$ ), *error steady state*, dan *over shoot* sistem dengan kontroler *fuzzy* P:

- *Rise time* (5% sampai 95%) :  $2,79 - 0,15 = 2,64$  detik
- *Settling time* ( $\pm 5\%$ ) :  $3,78$  detik
- *Error steady state* :  $0,0004$
- *Overshoot* :  $0$

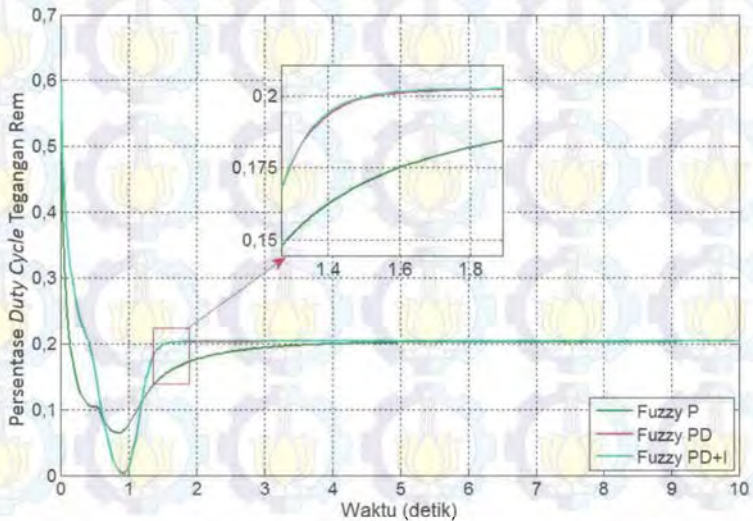
Berikut merupakan penentuan nilai *rise time* (5%-95%), *settling time* ( $\pm 5\%$ ), *error steady state*, dan *over shoot* sistem dengan kontroler fuzzy PD:

- *Rise time* (5% sampai 95%) :  $1,05 - 0,13 = 0,92$  detik
- *Settling time* ( $\pm 5\%$ ) :  $1,17$  detik
- *Error steady state* :  $0,0004$
- *Overshoot* :  $0$

Berikut merupakan penentuan nilai *rise time* (5%-95%), *settling time* ( $\pm 5\%$ ), *error steady state*, dan *over shoot* sistem dengan kontroler fuzzy PD+I:

- *Rise time* (5% sampai 95%) :  $1,04 - 0,13 = 0,91$  detik
- *Settling time* ( $\pm 5\%$ ) :  $1,17$  detik
- *Error steady state* :  $0$
- *Overshoot* :  $0$

Gambar 4.2 berikut merupakan sinyal kontrol kontroler fuzzy P, fuzzy PD, serta fuzzy PD+I:



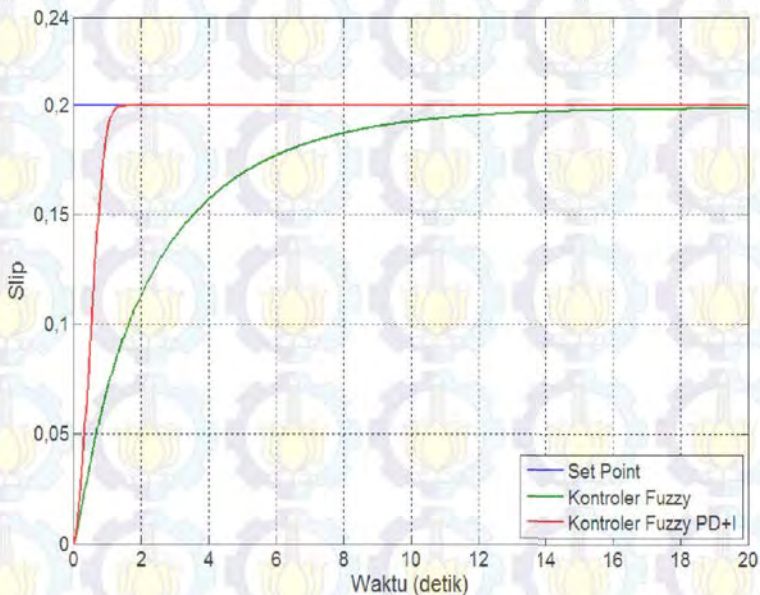
**Gambar 4.2** Sinyal kontrol Kontroler Fuzzy P, Fuzzy PD, Fuzzy PD+I



Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa sinyal kontrol dari kontroler *fuzzy* P, kontroler *fuzzy* PD, dan kontroler *fuzzy* PD+I telah memenuhi rentang kerja tegangan rem elektromagnetik, yakni antara 0 sampai 12.

### 1.2.2 Perbandingan Kontroler *Fuzzy* PD+I dengan *Fuzzy*

Perbandingan hasil simulasi sistem antara kontroler *fuzzy* PD+I dengan kontroler *fuzzy* sesuai dengan Gambar 4.3 berikut:



**Gambar 4.3** Perbandingan Kontroler *Fuzzy* Dengan *Fuzzy* PD+I

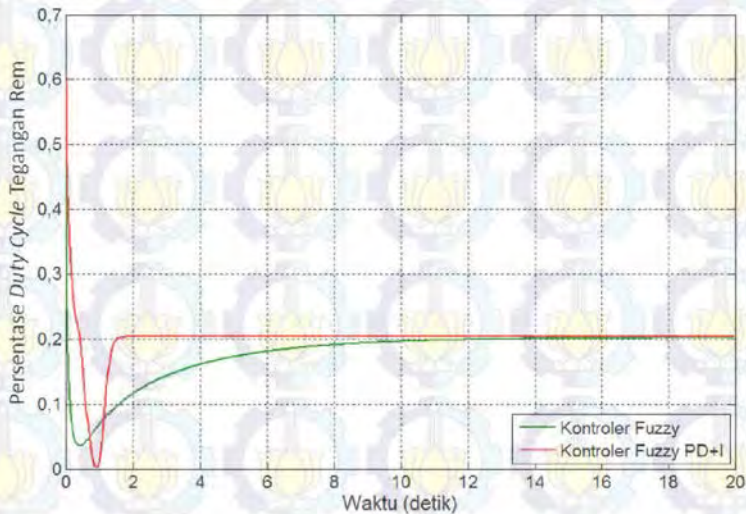
Berikut merupakan penentuan nilai *rise time* 5%-95%, *settling time* ( $\pm 5\%$ ) *error steady state*, dan *over shoot* sistem dengan menggunakan kontroler *fuzzy*:

- *Rise time* (5% sampai 95%) :  $8,88 - 0,18 = 8,7$  detik
- *Settling time* ( $\pm 5\%$ ) : 12,16 detik
- *Error steady state* : 0,0004
- *Overshoot* : 0

Dari perbandingan nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, serta *error steady state* antara kontroler *fuzzy* dengan kontroler *fuzzy* PD+I,

terlihat bahwa kontroler *fuzzy* memiliki nilai *rise time* dan *settling time* yang lebih lama dibandingkan kontroler *fuzzy* PD+I, yakni sebesar 8,7 detik dan 12,16 detik. Kedua kontroler tidak memiliki *overshoot*. Kontroler *fuzzy* memiliki *error steady state* yang sangat kecil sebesar 0,0004, sedangkan kontroler *fuzzy* PD+I tidak memiliki *error steady state*.

Perbandingan sinyal kontroler antara kontroler *fuzzy* PD+I dengan kontroler *fuzzy* sesuai pada Gambar 4.4 berikut:

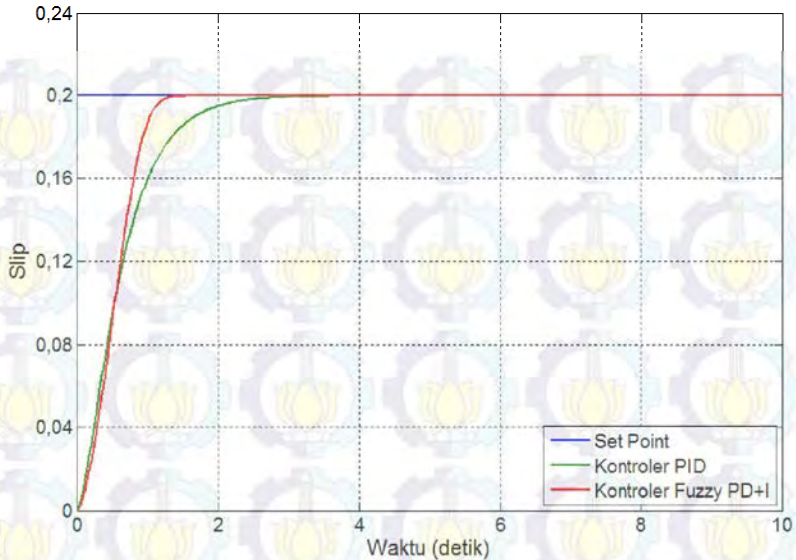


**Gambar 4.4** Perbandingan Sinyal Kontrol *Fuzzy* PD+I dan *Fuzzy*

Pada Gambar 4.4, kontroler *fuzzy* maupun kontroler *fuzzy* PD+I telah memenuhi rentang kerja kerja tegangan rem elektromagnetik, yakni antara 0 sampai 12.

### 1.2.3 Perbandingan Kontroler *Fuzzy* PD+I dengan PID

Perbandingan respon antara kontroler PID dengan kontroler *fuzzy* PD+I dapat dilihat pada Gambar 4.5. Kontroler PID yang digunakan memiliki nilai  $K_P$  sebesar 3,8, nilai  $K_d$  sebesar 2,8, dan nilai  $K_i$  sebesar 1,5. Nilai  $K_P$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  tersebut merupakan hasil *trial and error* yang dilakukan penulis. Sinyal kontrol dari kontroler PID juga diberi nilai saturasi antara nol sampai satu untuk mencegah rentang nilai sinyal kontrol yang melebihi rentang kerja *duty cycle* rem elektromagnetik yang digunakan.



**Gambar 4.5** Perbandingan Kontroler *Fuzzy* PD+I dengan PID

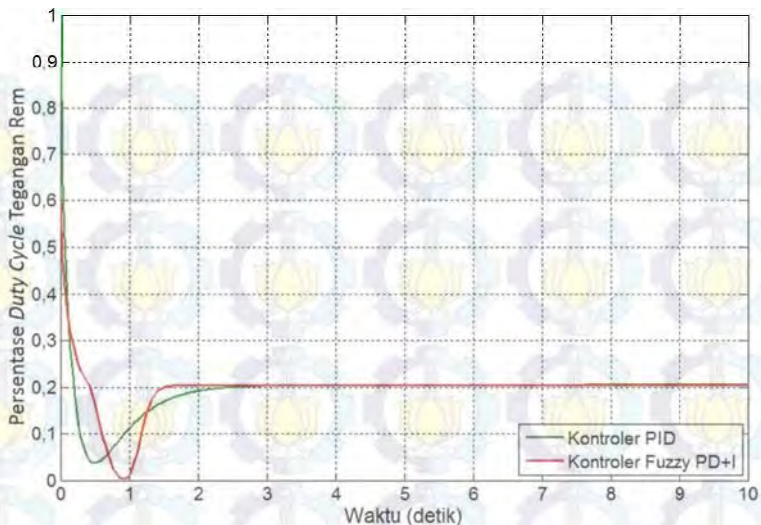
Berikut merupakan penentuan nilai *rise time* 5%-95%, *settling time* ( $\pm 5\%$ ), *error steady state*, dan *over shoot* sistem dengan menggunakan kontroler PID:

- *Rise time* (5% sampai 95%) :  $1,7 - 0,1 = 1,6$  detik
- *Settling time* ( $\pm 5\%$ ) : 2,28 detik
- *Error steady state* : 0
- *Overshoot* : 0

Dari perbandingan nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, serta *error steady state* antara kontroler PID dengan kontroler *fuzzy* PD+I, terlihat bahwa kontroler PID memiliki nilai *rise time* dan *settling time* yang lebih lama dibandingkan kontroler *fuzzy* PD+I, yakni sebesar 1,6 detik dan 2,28 detik. Kontroler PID dan kontroler *fuzzy* PD+I tidak memiliki *overshoot*. maupun *error steady state*.

Perbandingan sinyal kontrol antara kontroler *fuzzy* PD+I dengan kontroler PID sesuai pada Gambar 4.6 berikut:





**Gambar 4.6** Perbandingan Sinyal Kontrol *Fuzzy* PD+I dengan PID

Kontroler *fuzzy* PD+I maupun PID telah memenuhi rentang kerja tegangan rem elektromagnetik, yakni antara 0 sampai 12. Sinyal kontrol dari kontroler *fuzzy* PD+I lebih kecil dibandingkan dengan sinyal kontrol dari kontroler PID, namun respon yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan kontroler PID, sesuai dengan gambar diatas.

Pada Tabel 4.1 berikut merupakan hasil perbandingan dari kontroler PID, kontroler *fuzzy*, dan kontroler *fuzzy* PD+I:

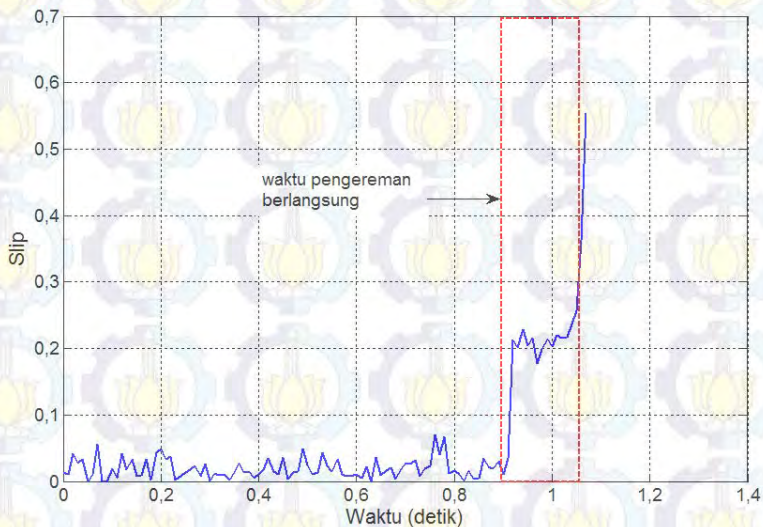
**Tabel 4.1** Hasil Perbandingan Kontroler PID, *Fuzzy*, dan *Fuzzy* PD+I

Kontroler	<i>Rise time</i> (detik)	<i>Settling time</i> (detik)	<i>Maksimum overshoot</i> (%)	<i>Error steady state</i>
PID	1,6	2,28	0	0
<i>Fuzzy</i>	8,7	12,16	0	0,0004
<i>Fuzzy</i> PD+I	0,91	1,17	0	0

Pada Tabel 4.1, terlihat bahwa kontroler *fuzzy* PD+I lebih baik dibandingkan dengan kontroler PID maupun kontroler *fuzzy*. Kontroler *fuzzy* PD+I juga memenuhi kriteria respon sistem yang telah ditentukan sebelumnya, yakni nilai *rise time* kurang dari 1 detik, nilai *settling time* kurang dari 2 detik, *overshoot* kurang dari 10%, serta tidak ada *error steady state*.

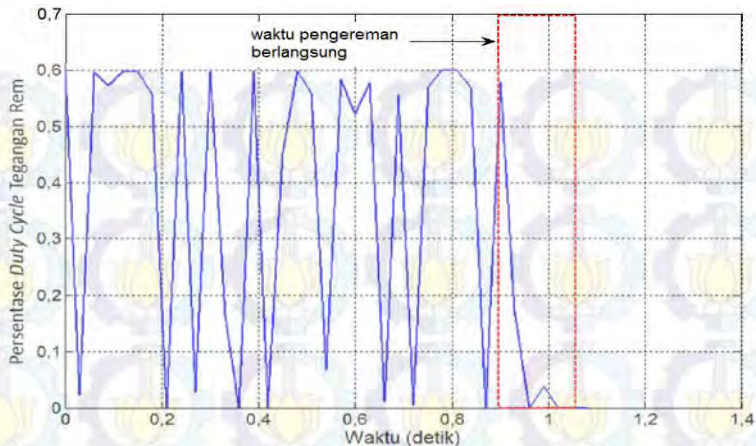
### 1.3 Implementasi Sistem

Implementasi sistem bertujuan untuk menguji kontroler yang telah dirancang agar mampu diterapkan dan menghasilkan respon *plant* yang diinginkan pada *real plant* simulator ABS, yakni slip pengereman berada pada nilai 0,2. Gambar 4.7 Berikut merupakan respon *real plant* simulator ABS dengan menggunakan kontroler *fuzzy* PD+I:



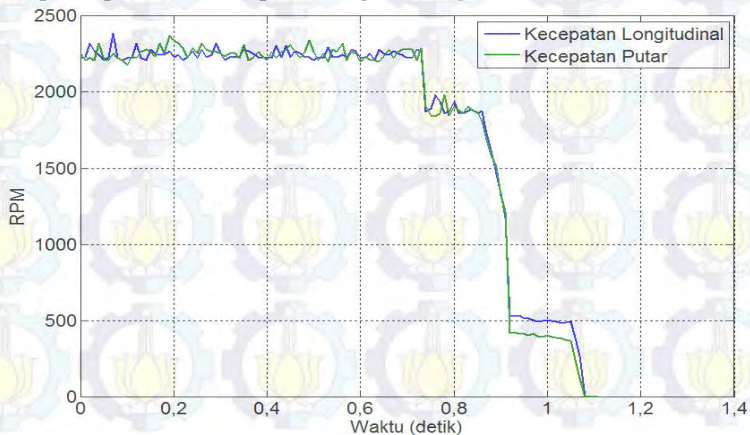
**Gambar 4.7** Respon *Real Plant* Menggunakan Kontroler *Fuzzy* PD+I

Dari respon *real plant* terlihat bahwa kontroler *fuzzy* PD+I mampu mempertahankan slip pada nilai 0,2 selama pengereman berlangsung. Namun pada implementasi, terjadi perbedaan pada skala waktu akibat sampling sebesar 0,03 yang digunakan pada Matlab tidak menunjukkan waktu sesungguhnya. Gambar 4.8 berikut merupakan sinyal kontrol kontroler *fuzzy* PD+I pada *real plant* simulator ABS:



**Gambar 4.8** Sinyal Kontrol Kontroler *Fuzzy* PD+I saat Implementasi

Pada Gambar 4.8, sinyal kontrol yang dikeluarkan kontroler *fuzzy* PD+I memiliki kesamaan dengan sinyal kontrol pada simulasi. Hasil respon sistem dan sinyal kontrol pada saat implementasi menunjukkan bahwa perancangan kontroler *fuzzy* PD+I dapat dikatakan berhasil, namun waktu sampling yang kecil pada Matlab saat *real time* membuat skala waktu grafik berubah. Gambar 4.9 berikut merupakan grafik penurunan kecepatan putar dan kecepatan longitudinal *plant* simulator ABS:



**Gambar 4.9** Penurunan kecepatan putar dan kecepatan longitudinal



Kontroler *fuzzy* PD+I mampu menurunkan kecepatan putar dan kecepatan longitudinal secara bertahap, sehingga roda tidak terkunci dan penurunan kecepatan terjadi secara aman, sesuai dengan Gambar 4.9.



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

Pada Bab Penutup, hasil analisis simulasi dan implementasi sistem akan ditarik kesimpulan dari pengerjaan Tugas Akhir ini, sekaligus saran untuk penelitian selanjutnya. Pada bab ini terdapat dua bahasan pokok, yakni kesimpulan dan saran.

#### **1.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang dapat diperoleh berdasarkan hasil pengujian dan analisis sistem adalah sebagai berikut:

1. Kontroler *fuzzy* PD+I mampu mempertahankan nilai slip pada 0,2 atau 20 % dari slip maksimum.
2. Hasil respon sistem dengan menggunakan kontroler *fuzzy* PD+I lebih baik dibandingkan dengan kontroler *fuzzy* dan kontroler PID.
3. Sinyal kontrol kontroler *fuzzy* PD+I memenuhi rentang kerja rem elektromagnetik, yakni persentase *duty cycle* tegangan nol sampai satu untuk tegangan kerja rem dari 0 sampai 12 Volt.
4. Hasil implementasi menunjukkan bahwa kontroler *fuzzy* PD+I mampu mempertahankan slip pada nilai 0,2, namun dengan perubahan skala waktu pada Matlab akibat waktu sampling yang diberikan terlalu kecil.

#### **1.2 Saran**

Pengujian simulator ABS pada Tugas Akhir ini hanya menggunakan satu buah kondisi jalan, yakni dalam keadaan kering. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat diterapkan beberapa kondisi jalan untuk mendapatkan beberapa koefisien gesek jalan yang berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Raesian, N. , Khajepour dan M. Yaghoobi, "A New Approach in Anti-lock Braking System (ABS) Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Self-tuning PID Controller," *International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, pp. 530-535, 2011.
- [2] Yang, K, J. Li, Youde, H. Wan, Z. Wang, C. Li dan S. Tan, "Simulation of Fuzzy PI Controller for ABS base on Electromechanical brake system," *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pp. 407-412, 2006.
- [3] Kogut, K, "Anti-lock Braking System Modelling and Parameters Identification," *IEEE Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pp. 342-346, 2014.
- [4] Antic, D, V. Nikolic, D. Mitic, M. Milojkovic dan S. Peric, "Sliding Mode Control of Anti-lock Braking System: An Overview," *Automatic Control and Robotics*, vol. 9, pp. 41-58, 2010.
- [5] Precup, R. E., S. V. Spataru, M. E. Petriu, S. Preitl, M. B. Radac dan C. A. Dragos, "Stable and Optimal Fuzzy Control of a Laboratory Antilock Braking System," *IEEE/ASME International Conferenco on Advance Intelligent Mechatronics*, pp. 593-598, 2010.
- [6] Astrom, K. J. dan B. Wittenmark, *Adaptive Control Second Edition*, New York: Dover Publications, Inc, 2008.
- [7] Ljung, L, *System Identification : Theory for The User Second Edition*, New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1999.
- [8] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [9] ----, *Arduino Board Uno*, 15 April 2015. [Online]. <<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>.
- [10] ----, *Arduino Getting Started*, 15 April 2015. [Online]. <<http://resources.intenseschool.com/arduino-getting-started/>>.
- [11] ----, *Electro-Magnetic Clutches Brakes*, mikipulley co.,ltd., Kawasaki, 2015.
- [12] Hayt, J. William dan J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics Sixth Edition*, Boston: McGraw-Hill, 2001.



- [13] -----, *Infrared Speed Sensing Module*, 16 April 2015. [Online]. <<https://sites.google.com/site/myscratchbooks/home/projects/project-11-infrared-speed-sensing-module>>.
- [14] -----, *Optical Shaft Encoder*, 16 April 2015. [Online]. <[http://www.vexrobotics.com/wiki/Optical\\_Shift\\_Encoder](http://www.vexrobotics.com/wiki/Optical_Shift_Encoder)>.
- [15] Xue, D, Y. Chen and D. P. Atherton, *Linear Feedback Control Analysis and Design with MATLAB*, Philadelphia: Siam, 2007.
- [16] Passino, Kevin M. dan S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, California: Addison-Wesley, 1998.
- [17] Lilly, J. H., *Fuzzy Control and Identification*, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc, 2010.
- [18] -----, *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*, USA: The MathWorks. Inc, 2015.
- [19] Bhusan, B, N. Jha, S. Devra dan S. S. Pillai, "Performance Analysis of PID and Fuzzy PD+I Controller on Nonlinear Systems," *IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, pp. 1195-1200, 2014.
- [20] -----, *Nisca Motor DC*, Japan: Nisca Inc., 2015.
- [21] Bosch, R, *Electronic Automotive Handbook First Edition*, Bently Publishers, 2002.

## RIWAYAT PENULIS



Muhammad Fasih Mubarrok lahir di Jombang pada tanggal 23 Mei 1992. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Machsun dan Inayatul Ainiyah. Memulai pendidikan formal di MI Perguruan Muallimat Cukir, MTs. Salafiyah Syafi'iyah Tebuireng, dan SMAN 2 Jombang. Setelah lulus pada jenjang sekolah menengah atas pada tahun 2011, penulis meneruskan ke jenjang perguruan tinggi Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis aktif dalam berbagai organisasi maupun lomba karya tulis ilmiah. Spesialisasi bidang studi yang ditekuni penulis adalah Teknik Sistem Pengaturan. Pada bulan Juni 2014, penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.